

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS
EXPERIMENTALES



TESIS DOCTORAL

Didáctica de la nutrición vegetal

Análisis de los principales manuales de fisiología vegetal y de las concepciones de los estudiantes del Máster Universitario en Formación del Profesorado de ESO y Bachillerato de la UCM

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA

PRESENTADA POR

Irene Angosto Sánchez

DIRECTOR

Juan Gabriel Morcillo Ortega
José Luis Maldonado Polo

Madrid, 2018



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

Facultad de Educación
Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales

TESIS DOCTORAL

DIDÁCTICA DE LA NUTRICIÓN VEGETAL

Análisis de los principales manuales de fisiología vegetal y de las concepciones de los estudiantes del Máster Universitario en Formación del Profesorado de ESO y Bachillerato de la UCM

Por
Irene Angosto Sánchez

Dr. Juan Gabriel Morcillo Ortega
Director de Tesis

Dr. José Luis Maldonado Polo
Director de Tesis

Madrid, España
Abril 2017

*Este trabajo está dedicado a Laura; sin ella
nunca habría llegado hasta aquí.*

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría manifestar mi agradecimiento a las siguientes personas:

A mis directores de Tesis, **Juan Gabriel Morcillo**, por meterse en este proyecto y creer en mi capacidad para llevarlo a cabo. Por el tiempo y el esfuerzo empleado para que saliera adelante. Y **José Luis Maldonado** por ayudar y apoyar el proyecto. Por su tiempo y trabajo.

A mis **padres** que con su esfuerzo y sacrificio me dieron la oportunidad de formarme en el mejor colegio y que siguieron apoyándome para que estudiara todo lo que quise y me embarcara en todos los proyectos que deseé confiando siempre en mí.

A mi familia que han esperado y aguantado tantas ausencias. A mi **hermana** y mi **prima** por adelantarme trabajo y correcciones, a mi **tío** por su enorme cariño y presencia, a **Pepa** por su escucha, a **Nines** por su inagotable rezo, a **Rafa** por no dejarme olvidar que esto era importante, a **Jose** por su generosidad y a **Lila** por su espera y amor.

A **María José Salmerón**, mi ejemplo, maestra y compañera que siempre ha creído en mí y me ha empujado a superarme.

A **Susana Cardona**, por darme esperanza en todo lo humano y mágico del mundo.

A **Gonzalo Martín**, por ser mi compañero y mi roca; por haberme acompañado en mi crecimiento sin juzgarme jamás y convirtiendo los momentos difíciles en risas y juegos.

A **Paloma Maraver**, por convertirse en mi hermana, por enseñarme tanto, por acompañarme y creer en mí.

A **Sandra Magro**, por forzarme siempre a aprender algo más y por las llamadas de teléfono en los momentos perdidos.

A **Marta Fernández**, por llevarse el ordenador a sus vacaciones y ayudarme con paciencia con la informática que tanto me desespera.

A **Laura Estévez**, por ser mi amiga desde siempre, por abrazarme y quererme tal y como soy.

A **Pilu Volver**, por implicarse en todos los proyectos. Por tantas horas de conversación enriquecedora y por ser mi testigo en diferentes contextos.

A **mis alumnos**, pasados, presentes y futuros, por vuestra energía, ilusión y escucha en los momentos en los que hablo sobre ciencia y teorías. Sin duda sois la razón de esta tesis.

A **Laura**, por todo. Por los paseos y las vacaciones perdidas, por los ratos de soledad sufridos y de compañía generosa, por tapar con amor, paciencia y risas todos los agujeros que mi dedicación al trabajo han producido. Por ayudarme siempre, por apoyarme en todo, por creer en mí y salvarme.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	<i>Página</i>
1. Introducción y objetivos.	1
1.1. Importancia del tema	3
1.2. Importancia de su enseñanza y aprendizaje	5
1.3. Dificultades en su enseñanza y aprendizaje	6
1.4. La fotosíntesis en los currículos oficiales	7
1.5. Los comienzos de la investigación: Estudio previo	9
1.6. Objetivos de la investigación	14
1.7. Estructura de la memoria	16
2. Marco teórico.	19
2.1. Historia del camino hasta la comprensión de la nutrición vegetal.....	22
2.1.1. Primeras ideas: El nacimiento de una nueva ciencia	23
2.1.2. Un siglo de estudio de los procesos de respiración y fotosíntesis hasta su formulación química.....	28
2.1.3. Camino a una comprensión más profunda: Orgánulos y pigmentos fotosintéticos, desarrollo de la química, bioenergética de la luz y estudio de la fermentación.....	36
2.1.4. Comienzo de una nueva etapa: fragmentación de las unidades básicas de la materia y de la vida	42
2.1.5. Avance hacia un conocimiento profundo: Investigaciones y descubrimientos del s.XX	44
2.2. Problemas y dificultades para la enseñanza y el aprendizaje de la nutrición vegetal en general y del proceso de fotosíntesis en particular.....	53
2.2.1. El origen de las ideas alternativas	54
2.2.2. El caso particular de las ciencias	58
2.2.3. El problema particular de la nutrición de las plantas	60

2.3. Relación entre la historia de la ciencia y la enseñanza de la nutrición vegetal.....	67
2.3.1. Primeros años	68
2.3.2. Primeros estudios científicos y los cursos de Secundaria	68
2.3.3. Profundización científica	69
3. Metodología de estudio.	71
3.1. El problema de la investigación	75
3.1.1. Los objetivos	78
3.2. Diseño del estudio	79
3.2.1. Análisis de los manuales universitarios	79
3.2.2. Estudio de los conocimientos sobre la nutrición vegetal y la fotosíntesis que tienen los futuros profesores de biología y geología de Secundaria y Bachillerato	83
3.2.3. Descripción del cuestionario utilizado	86
▪ Pregunta 1	86
▪ Pregunta 2	87
▪ Pregunta 3	88
▪ Pregunta 4	88
▪ Pregunta 5	90
▪ Pregunta 6	90
▪ Pregunta 7	91
▪ Pregunta 8	93
▪ Pregunta 9	94
▪ Pregunta 10	101
▪ Pregunta 11	103
▪ Pregunta 12	108
▪ Pregunta 13	109
▪ Pregunta 14	110
4. Resultados y discusión.	111
4.1. Análisis del contenido sobre nutrición vegetal y fotosíntesis en los manuales universitarios	113

4.1.1. Breve análisis del contenido de cada uno de los manuales	115
▪ Libro 1	115
▪ Libro 2	120
▪ Libro 3	134
▪ Libro 4	140
▪ Libro 5	146
4.1.2. Análisis comparativo de los manuales a partir de cinco cuestiones	160
▪ Primera cuestión	161
▪ Segunda cuestión	163
▪ Tercera cuestión	165
▪ Cuarta cuestión	165
▪ Quinta cuestión	168
4.2. Análisis de los resultados de los cuestionarios	169
4.2.1. Análisis del porcentaje de acierto-error de cada pregunta	170
▪ Pregunta 1	172
▪ Pregunta 2	173
▪ Pregunta 3	174
▪ Pregunta 4	175
▪ Pregunta 5	177
▪ Pregunta 6	179
▪ Pregunta 7	180
▪ Pregunta 8	183
▪ Pregunta 9	185
▪ Pregunta 10	188
▪ Pregunta 11	191
▪ Pregunta 12	193
▪ Pregunta 13	194
▪ Pregunta 14	196
4.2.2. Análisis de la relación en los resultados de preguntas vinculadas	198

4.2.2.1.	Relación entre las preguntas 4, 7 y 8: La síntesis de materia orgánica	200
4.2.2.2.	Relación entre las preguntas 13 y 14: Destino de la savia bruta y de la savia elaborada	203
5.	Conclusiones.	207
6.	Bibliografía.	221
7.	Anexo I: Estudio previo.	239
I.1.	El cuestionario previo.....	244
I.2.	Los resultados del estudio previo.....	247
I.3.	Conclusiones del estudio previo.....	268
8.	Anexo II: Cuestionario para los estudiantes del Máster.	269

ÍNDICE DE IMÁGENES, GRÁFICAS Y TABLAS

Imágenes:

- **Imagen 2.1.** Asimilación fotosintética de nitrato y su relación con la formación de ATP y poder reductor durante la primera fase de la fotosíntesis p.52
- **Imagen 4.1.** Asimilación fotosintética de nitrato y regulación p.139
- **Imagen 4.2.** Acoplamiento del flujo de electrons fotosintético en la reducción del nitrito p.145
- **Imagen 4.3.** Relación entre el metabolism del C y del N p.157
- **Imagen 4.4.** Relación entre el metabolism del C y del N (modificado) p.159
- **Imagen 4.5.** Comparación de las gráficas de las preguntas 4, 7 y 8 p.201
- **Imagen I.1.** Ejemplos del nivel 1..... p.264
- **Imagen I.2.** Ejemplos del nivel 2..... p.265
- **Imagen I.3.** Ejemplos del nivel 3..... p.266

Gráficas

- **Gráfico 4.1.** Preguntas de verdadero y falso. Porcentaje de acierto y error..... p.172
- **Gráfico 4.2.** Pregunta 7: Finalidad de la fotosíntesis. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas..... p.180

- **Gráfico 4.3.** Pregunta 8: Función de las sales minerales. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas..... p.184
- **Gráfico 4.4.** Pregunta 9: Qué es el CO₂. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas..... p.186
- **Gráfico 4.5.** Pregunta 10: Las células vegetales. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas..... p.189
- **Gráfico 4.6.** Pregunta 11: Fotosíntesis vs Respiración. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas..... p.191
- **Gráfico 4.7.** Pregunta 12: La nutrición autótrofa. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas..... p.193
- **Gráfico 4.8.** Pregunta 13: La savia bruta. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas..... p.195
- **Gráfico 4.9.** Pregunta 14: La savia elaborada. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas..... p.197
- **Gráfico 4.10:** Comparación de preguntas 4, 7 y 8..... p.201
- **Gráfico 4.11:** Preguntas 13 y 14..... p.204
- **Gráfico I.1:** Procesos contrarios..... p.249
- **Gráfico I.2:** Día y noche. p.251
- **Gráfico I.3:** Plantas verdes..... p.252
- **Gráfico I.4:** Peligroso dormir con plantas..... p.253

- **Gráfico I.5:** Raíces son bocas..... p.254
- **Gráfico I.6:** Fotosíntesis tipo de respiración..... p.255
- **Gráfico I.7:** Abono es alimento..... p.256

Tablas

- **Tabla 4.1.** Número de páginas dedicadas a cada uno de los procesos de asimilación fotosintéticos y las relaciones entre las páginas que se dedican a explicar la fijación de nitrato y sulfato frente a las que se utilizan para el carbono p.165
- **Tabla I.1.** Finalidad de la fotosíntesis p.257
- **Tabla I.2.** Definición de nutrición autótrofa p.262
- **Tabla I.3.** Porcentajes del registro de los dibujos pertenecientes a los distintos niveles definidos p.268

RESUMEN

Dentro de la enseñanza de la biología, el tema de la nutrición vegetal es uno de los más repetidos en todos los niveles y temarios de la mayoría de los países. Sin embargo, a pesar de su importancia, sigue siendo, después de décadas de investigación didáctica, uno de los más conflictivos en el aula tanto en su comprensión como en su asimilación, así como uno de los que más cantidad de concepciones alternativas acumula.

Cuando se analizan y discuten las causas parecen destacar la tendencia que tiene el ser humano de comparar los modelos anatómicos y fisiológicos de los diferentes organismos con el modelo antropomórfico sacando así conclusiones alejadas de la realidad, la dificultad intrínseca del proceso por su marcado carácter interdisciplinar al requerir el manejo y la comprensión de una enorme cantidad de conceptos e, incluso, la temporalización incorrecta de los contenidos a lo largo de la enseñanza de Primaria y Secundaria que provocan la ausencia de conocimientos previos necesarios de otras materias, como una buena base de química. En resumen, las causas responden a una malla compleja de muchos factores interconectados lo que hace difícil su estudio y su abordaje en búsqueda de una solución, ya que aislar las variables para ver su efecto parece tarea compleja.

Es cierto que las concepciones alternativas con respecto a la nutrición vegetal se suceden en todos los niveles educativos, desde Primaria hasta Bachillerato, incluyendo los libros de texto de todos estos cursos; incluso se ha llegado a postular que algunas de estas ideas alternativas aumentan a medida que se avanza en la formación académica en ciencias, alcanzando, en algunas ocasiones, a los propios profesores.

Tras un estudio previo que nos llevó a comprobar la existencia de muchas de estas ideas alternativas con respecto a estos temas, surgieron nuevas preguntas dirigidas especialmente a buscar algún punto que se pudiera considerar el "inicio" de esta problemática.

Por lo tanto, con esta investigación pretendemos obtener una visión general de las ideas que transmiten acerca de la nutrición vegetal las dos fuentes de conocimientos principales para los estudiantes de Secundaria y Bachillerato: sus futuros profesores y los manuales de fisiología vegetal a partir de los cuales los autores de libros de texto para Secundaria y Bachillerato elaboran sus textos. ¿Cómo nadie va a corregir cualquier error conceptual que tenga si las fuentes más fiables a las que podría recurrir no están bien planteadas?

Para comprobar esto primero ofrecemos un repaso histórico de la evolución de la concepción de la nutrición de las plantas a través de los experimentos y los descubrimientos que llevaron a su comprensión desde la época de Aristóteles hasta los años 50, con los experimentos de Calvin y sus colaboradores. También realizamos un repaso de los estudios que se han llevado a cabo acerca de la problemática de este tema en el proceso de enseñanza-aprendizaje, resaltando aquellos que se centran en las ideas alternativas o preconceptos de los estudiantes.

A partir de aquí se han indagado las concepciones de los alumnos del Máster de Formación del Profesorado de la especialidad de Biología y Geología de la UCM durante los últimos 6 cursos a través de la realización de un cuestionario de preguntas básicas acerca de la nutrición de las plantas y de la fotosíntesis. El cuestionario ha sido diseñado para detectar errores básicos e incoherencias en la concepción de estos procesos, no para comprobar el nivel de profundidad que poseen los encuestados sobre ellos. Con esto se pretende analizar la situación de los futuros profesores de Secundaria y Bachillerato sobre el tema.

También se ha analizado la propuesta didáctica sobre la fotosíntesis de los cinco manuales más utilizados para estudiarla en Madrid y, seguramente, en España. En estos textos especializados en fisiología vegetal hemos detectado la presencia de numerosas ideas alternativas e incoherencias acerca de la nutrición de las plantas que también se encuentran en los estudiantes del Máster. Además hemos comprobado que la propuesta didáctica general que ofrecen los principales manuales de fisiología vegetal sobre el proceso fotosintético se basa en un esquema anticuado y lleno de contradicciones.

Para terminar se ofrece una propuesta didáctica para el proceso de fotosíntesis que plantea un tratamiento global e integrador del proceso que incluye la síntesis del resto de componentes orgánicos por la planta, no solo de los azúcares, como parte de la fotosíntesis.

ABSTRACT

Within the teaching of biology, the subject of plant nutrition is one of the most often repeated, at all levels and agendas in most countries. However, despite its importance, it remains, after decades of didactic research, one of the most conflicting in the classroom, both in its understanding and its assimilation, as well as one which has accumulated the largest number of alternative conceptions.

When the causes are analysed and discussed, what seems to stand out is the human tendency to compare the anatomical and physiological models of the different kinds of organisms with the anthropomorphic model, thus drawing conclusions that are far from reality. The intrinsic difficulty of the process, due to its markedly interdisciplinary character, require the management and understanding of a huge number of concepts, and also the incorrect timing of this content through Primary and Secondary education results in the absence of the necessary prior knowledge of other subjects, such as a good basis in chemistry. In summary, these causes correspond to a complex network of many interconnected factors which makes it difficult to study and approach the subject in search of a solution, since isolating the variables to see their effect seems a complex task.

It is true that alternative conceptions regarding plant nutrition occur at all levels of education, from Primary to Baccalaureate, including textbooks of all these courses; It has even been postulated that some of these alternative ideas progress as academic education progresses in science, sometimes reaching the teachers themselves.

After a previous study that led us to verify the existence of many of these alternative ideas with respect to these issues, new questions arose, in particular connected with looking for some point that could be considered the "beginning" of this problematic.

Therefore, with this research we intend to obtain an overview of the ideas that are transmitted about plant nutrition by the two main sources of knowledge for

secondary and high school students: their future teachers and the manuals of plant physiology from which the authors of textbooks for Secondary schools and the Baccalaureate elaborate their texts. How could anyone correct any conceptual errors they might have if the most reliable sources they could turn to are not well thought out?

To address this, we firstly offer a historical review of the evolution of the conception of plant nutrition through the experiments and the discoveries that led to its understanding from the time of Aristotle to the 1950s, with the experiments of Calvin and his collaborators. We also perform a review of the studies that have been carried out on the issue of this topic in the teaching-learning process, highlighting those that focus on students' alternative ideas or preconceptions.

From there we have investigated the conceptions of the students of the Masters of the specialty of Biology and Geology of the UCM Teacher Training during the last 6 courses, through the completion of a questionnaire of basic questions about plant nutrition and photosynthesis. The questionnaire was designed to detect basic errors and inconsistencies in the conception of these processes, not to check the level of depth that respondents have about them. With this, the aim is to analyse the situation of future secondary and high school teachers for the subject.

The didactic proposal on the photosynthesis of the five manuals most used to study it in Madrid and, certainly, in Spain, has also been analysed. In these texts specialized in plant physiology we have detected the presence of numerous alternative ideas and inconsistencies about the nutrition of plants that are also found in students of the Master's programme. We have also verified that the general didactic proposal offered by the main manuals of plant physiology on the process of photosynthesis is based on an outdated and contradictory scheme.

Finally, a didactic proposal is offered for the process of photosynthesis that proposes a global and integrative treatment of the process, including the synthesis of other organic components by the plant, and not only of the sugars, as part of the photosynthesis.

1. Introducción

Esta memoria que se presenta a continuación como Tesis Doctoral afronta una investigación necesaria tanto en el ámbito de la biología, como en el de la didáctica de las ciencias de la naturaleza. El objeto es aportar algo de luz a la problemática que presenta la enseñanza y el aprendizaje de la nutrición vegetal y la fotosíntesis. Con este fin analizaremos, por un lado, las concepciones alternativas que, sobre este tema, están presentes en los estudiantes del Máster en Formación del Profesorado de ESO y Bachillerato de Biología y Geología de la Universidad Complutense de Madrid, al considerarlos como los futuros profesores de la asignatura de biología y geología en los niveles de Secundaria y Bachillerato, y, por tanto, los principales transmisores de los conocimientos acerca de estos temas. Además, por otro lado, también se analizan los contenidos y el tratamiento que dan a estos temas los principales manuales de fisiología vegetal, considerándolos la fuente de conocimiento más fiables para estudiantes de niveles especializados, profesores y escritores de los libros de texto de los niveles de Secundaria y Bachillerato.

1.1. IMPORTANCIA DEL TEMA

La fotosíntesis es un proceso de enorme importancia a nivel planetario por lo que resulta fundamental que las personas tengan conocimiento sobre él y lo valoren. Al observar la organización global de los seres vivos en la biosfera, se constata que el origen y el desarrollo de los sistemas biológicos se sustentan en la existencia de organismos autótrofos fotosintéticos, ya que estos son los únicos que asimilan la energía solar (Azcon-Bieto, 2008). Es gracias, principalmente, a estos organismos que se han podido desarrollar otras formas de vida no autótrofas en el planeta.

Los estudios ecológicos muestran que prácticamente todas las cadenas tróficas tienen a los vegetales en sus pilares. Los organismos fotosintéticos transforman en biomasa los componentes inorgánicos que asimilan gracias a la energía solar que absorben. La energía acumulada en esa biomasa, así como

la propia materia orgánica obtenida, son distribuidas después al resto de seres vivos gracias a las distintas cadenas tróficas. Sin los organismos fotosintetizadores no funcionaría el ciclo de la materia, por lo que el resto de organismos no tendríamos de la materia orgánica que necesitamos para nuestro desarrollo y mantenimiento; y tampoco se iniciaría el flujo de la energía en los ecosistemas al no haber ningún organismo capaz de asimilar la energía radiante del Sol. Por supuesto, y aunque no es el objetivo de la fotosíntesis, la liberación de oxígeno durante el proceso ha provocado que los seres vivos que podemos usarlo en la respiración celular seamos muy eficaces obteniendo la energía de los compuestos orgánicos. Esto ha permitido una enorme diversidad de formas y modelos taxonómicos, algunos de ellos con estilos de vida muy activos, que de otra manera no habrían sido posibles.

Además de tratarse de un proceso de interés general que debe despertar en los que lo conozcan un sentimiento de respeto hacia el medio ambiente y una conciencia de la situación tan delicada que viven nuestros ecosistemas, también se trata de un proceso de enorme importancia a causa de los nuevos retos a los que se enfrenta el ser humano en la actualidad; nos referimos a todo lo referente a la producción de alimentos para una población cada vez mayor y a la búsqueda de una solución a la contaminación, al cambio climático, a la pérdida de ecosistemas. También resulta importante para una ciencia en continuo auge como es la ingeniería genética y la biotecnología de las plantas para la producción de productos farmacéuticos y medicamentos.

De esta manera podemos afirmar que el estudio de la fotosíntesis es de una relevancia enorme tanto a nivel del desarrollo del pensamiento en sí mismo, como valor de concienciación para todas las personas, como para aquellos que quieran dedicarse a la investigación en varios campos o la producción agrícola y de alimentos.

1.2. **IMPORTANCIA DE SU ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE**

Desde hace ya unos años, un objetivo fundamental de la enseñanza es que los estudiantes adquieran, por encima de los contenidos, las competencias. Por supuesto, no ha desaparecido el interés porque los alumnos aprendan contenidos, ya que para desarrollar las capacidades con las que trabajarlos, es necesario, previamente, poseer algunos. Pero estos son vistos ahora como el camino para el desarrollo de esas capacidades. Dicho de otra manera, la adquisición de conocimientos es el camino, la “excusa” para desarrollar esas competencias y habilidades que creemos que necesitarán en un futuro cada vez más incierto.

La nutrición vegetal y, más concretamente, el proceso de fotosíntesis es un ejemplo perfecto del tipo de contenidos que ayudan a desarrollar muchas de estas capacidades. Esto se debe a que los procesos implicados no son sencillos ni estáticos sino que incluyen el cambio, la evolución en el tiempo de un fenómeno. Por lo tanto, para empezar, se trata de contenidos complicados que requieren de una capacidad de abstracción fuerte. No vale con definirlos para comprenderlos. Para entender realmente un proceso es necesario ponerlo en su contexto, comprender su finalidad, su punto de partida, las fuerzas que lo mueven, las fases que lo componen, los elementos que participan, la energía que posee para poder cambiar en el tiempo, etc.

Además de las características comunes a todos los procesos, la fotosíntesis en particular es un proceso bioquímico de carácter metabólico propio de los vegetales en el que participa la luz. Por lo tanto hacen falta conocimientos previos de química, como conocer los elementos y comprender las reacciones químicas de oxido-reducción; de física para poder entender la absorción de la luz y sus consecuencias a nivel electrónico; de citología para conocer las estructuras celulares en los que tiene lugar el proceso y relacionar la estructura y la función de las mismas; de histología vegetal para relacionar los tejidos en

los que se obtienen los nutrientes, en los que se dan las reacciones y cómo llegan de unos a otros, etc.

Por lo tanto, en el tema de la nutrición vegetal, en general, y el de la fotosíntesis, en particular, encontramos ejemplos perfectos de enseñanza transversal ya que integran un gran número de conceptos para su comprensión y están relacionados con diversas materias, como la fisiología, la ecología, la química y la física, entre otras. Sin embargo, a pesar de estar reconocidos como temas de gran importancia para los estudiantes, son también, unos de los temas en los que se encuentran mayores dificultades en su asimilación y comprensión dentro de la educación (Haslam & Treagust, 1987; Cañal, 1990; Cañal 2005; Angosto, 2013).

1.3. DIFICULTADES EN SU ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE

Como profesora de biología y geología en todos los niveles de la Educación Secundaria Obligatoria (ESO) y en 1º de Bachillerato durante los últimos 5 años, he ido observando que al introducir los temas de la nutrición vegetal y de la fotosíntesis muchas de las ideas que surgen en el aula están alejadas del saber científico. Lo mismo ocurre cuando se trabajan los conceptos de nutrición autótrofa y las cadenas tróficas. La concepción constante de que las plantas fabrican sus propios alimentos y que se alimentan por sí mismas, que la finalidad de la fotosíntesis es la producción de oxígeno y que la fotosíntesis es lo contrario a la respiración celular o una especie de respiración de las plantas, por poner algún ejemplo, se repiten año tras año independientemente del nivel educativo que imparta.

Esta dificultad para el aprendizaje de la nutrición vegetal y la fotosíntesis ha sido puesta en evidencia por numerosos estudios desde los años 80 (Wandersee, 1983; Astudillo & Gené, 1984; Rumelhard, 1985; Bishop *et al.*, 1986; Haslam & Treagust, 1987; Stavy *et al.*, 1987; Battinger *et al.*, 1988;

Maskill & Cachapuz, 1989; Tamir, 1989; Anderson *et al.*, 1990 Cañal, 1990; Thomas & Silk, 1990; Eisen & Stavy, 1993; Hazel & Prosser, 1994; Songer & Mintzes, 1994; Abdullah & Scaife, 1997; Hill, 1997; Çapa, 2000; Charrier & Obenat, 2001; Griffard, 2001; Özay, 2001; Sensoy, 2002; Tekkaya & Balci, 2003; Cañal, 2005; Çepni & Keleş, 2006; Charrier *et al.*, 2006; Marmaroti & Galanopoulou, 2006; Prokop & Fancovicová, 2006; Yenilmez & Tekkaya, 2006; Köse, 2008; Keleş & Kefeli, 2010; Angosto, 2013).

Parece claro que las investigaciones en este campo son bastante numerosas y, revisándolas, se pone de manifiesto la existencia de unas 50 ideas alternativas, solo acerca del concepto de la fotosíntesis. Uno de los hallazgos más interesantes al respecto es el carácter universal de estas concepciones, pues aparecen y se muestran prácticamente iguales en todos los países en los que el tema de la nutrición vegetal forma parte del currículo (Köse, 2008).

Algunos autores señalan que la producción de estas concepciones alternativas parece estar relacionada con una malla compleja de factores (Battinger *et al.*, 1988; Cañal, 1990) como una formación científica deficiente de los docentes en relación a este proceso, insatisfactorias condiciones de trabajo, inadecuada e insuficiente preparación didáctica, materiales curriculares con planteamientos tradicionales, contenidos no actualizados o con errores en los libros de texto, un esquema rígido de la organización escolar y las influencias negativas del contexto sociocultural cotidiano (Cañal 1990).

1.4. LA FOTOSÍNTESIS EN LOS CURRÍCULOS OFICIALES

El aprendizaje del proceso de la fotosíntesis es complicado por numerosas razones, y varía enormemente según el curso en el que se explique. En los currículos oficiales de nuestro país, en los primeros años (aún en Educación Primaria, 6-12 años), es solo nombrada como una de las características propias de ciertos reinos, especialmente de las plantas, trabajando así la

diferencia entre la célula animal y la vegetal a finales de esta etapa, y marcando la enorme importancia que las plantas tienen para el planeta y para nosotros, puesto que son ellas las que fabrican el oxígeno sin el cual no podríamos vivir.

Queremos entender que esta idea de que las plantas fabrican el oxígeno sin el cual el resto de seres vivos, en especial nosotros, no podríamos vivir, es remarcada por la mayoría de los profesores en un intento de despertar la conciencia ecológica y de respeto al medioambiente en los niños y las niñas cuando son pequeños, y de darle a la fotosíntesis la importancia que merece como uno de los procesos fundamentales de todo el flujo de materia y energía en los ecosistemas, como un proceso determinante para la vida en la Tierra tal y como la conocemos. Sin embargo, en estos niveles, el concepto solo es nombrado y catalogado como fundamental, no se desarrolla, ni se explica. Pero es en estos niveles, en los que no se llega a desarrollar el tema, ni tan siquiera explicarlo, cuando los estudiantes desarrollan una de las ideas alternativas más difíciles de erradicar, la concepción de la fotosíntesis como un proceso parecido a una respiración pero “al revés” (Cañal, 1999; Cañal, 2005). Básicamente, como un proceso de intercambio gaseoso en el que en vez de consumir oxígeno, como hacemos los animales, se genera; y así “todo está en equilibrio y funciona bien en el planeta”.

Cuando los estudiantes van ampliando sus conocimientos en ciencia y trabajan algunos aspectos fisiológicos y del metabolismo, la confunden constantemente con la respiración; creen que es un tipo de respiración pero propio de las plantas; la consideran un proceso contrario a la respiración; confunden los reactivos y los productos de ambos procesos; piensan que no pueden ocurrir a la vez, de forma que cuando la planta hace fotosíntesis, no respira; creen que la finalidad de la fotosíntesis es obtener energía, cuando ese es el objetivo de la respiración; etc. (Cañal, 2005). Y aunque observamos muchos preconceptos asociados al proceso fotosintético, lo cierto es que confundirlo, mezclarlo o relacionarlo erróneamente con el de la respiración se presenta en tantas

formas y tiene tanta incidencia, que podría considerarse como generador, a su vez, de otros nuevos errores conceptuales.

Es ya a partir de 1º de la ESO, cuando se puede llegar a dar una definición del proceso, pues es cuando se trabajan las funciones vitales de los seres vivos con cierta profundidad, explicando los diferentes tipos de nutrición (autótrofa y heterótrofa) y la función de algunos orgánulos celulares. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estos temas se trabajan mucho antes de que puedan entenderse realmente ya que, para empezar, requieren de unos conocimientos mínimos en química que los estudiantes aún no poseen. Y aunque no es hasta niveles más avanzados (en 4º de la ESO como pronto), cuando se trabaja realmente el concepto de fotosíntesis, de una manera o de otra, el proceso no deja de nombrarse desde los primeros años de la asignatura de ciencias de Primaria y posteriormente en Secundaria.

Lo cierto es que cuando en los niveles de Bachillerato (sobre todo en 2º de Bachillerato), el tema se trabajaba con bastante profundidad, llegando al nivel bioquímico y del metabolismo, tanto los estudiantes, como los propios profesores tienen la sensación de que solo es necesario profundizar y contar los detalles y especificar las reacciones químicas de un tema que, en líneas generales, creen que se conoce y se comprende a causa del gran número de veces que el tópico ha salido en clase por un motivo o por otro. Cuando la realidad es que nunca se les ha explicado de verdad; en todo momento se ha tratado por encima, con frases e ideas vagas y, muchas veces, incorrectas (Charrier, 2001).

1.5. LOS COMIENZOS DE LA INVESTIGACIÓN: ESTUDIO PREVIO

Puesto que la idea principal de este trabajo surgió a partir del estudio que realizamos como Trabajo de Fin de Máster (TFM), consideramos apropiado contar, a modo de introducción, cómo nació este trabajo y los resultados

obtenidos en este primer estudio que hicimos sobre el tema de la nutrición vegetal y la fotosíntesis. Otra razón es que esta Tesis se ha desarrollado como una continuación de los resultados obtenidos en ese estudio previo, que sirvieron para generarnos una idea general de la problemática acerca de estos temas, en especial del proceso fotosintético. A partir de estos resultados surgieron nuevas preguntas, más concretas, que darían como resultado el objeto de estudio de este trabajo presentado en forma de Tesis Doctoral.

La idea inicial del estudio previo surgió a partir de nuestra práctica educativa, muy escasa en aquellos momentos, y en las impresiones que nos expresaban amigos y conocidos sobre un tema que por que sentíamos gran interés desde que éramos estudiantes. Ellos afirmaban que curso tras curso venían constatando el tema de la nutrición de las plantas generaba muchas dificultades en los estudiantes y que, normalmente, no conseguían que lo asimilaran, ni comprendieran. Por eso, a la hora de elegir nuestra investigación para el Trabajo de Fin de Máster, nos animamos a indagar la presencia de ciertos preconceptos acerca de la fotosíntesis en el alumnado de Educación Secundaria y Bachillerato.

Partimos de la idea de que el aprendizaje de la nutrición vegetal arrastra una cantidad enorme de errores conceptuales, ideas alternativas y preconceptos, que parecen, en muchas ocasiones, imposibles de erradicar (Köse, 2008); muchos de ellos asociados al concepto de fotosíntesis.

Teniendo en cuenta que se considera que es en Secundaria cuando se trabaja el tema y en Bachillerato cuando se profundiza y se estima como totalmente desarrollado, en el momento de diseñar nuestro estudio previo, pensamos que estos eran los niveles más idóneos para estudiar esas ideas alternativas y las concepciones que poseían los estudiantes. Pero, lo cierto es que el objetivo del estudio era aún más ambicioso, pues al leer diferentes investigaciones al respecto encontramos una idea que nos resultó tan llamativa como alarmante. Encontramos que los preconceptos en el tema de la fotosíntesis aumentan a

medida que los alumnos avanzan en su formación académica (Cañal, 2005). Así, además de investigar las concepciones de los estudiantes en los niveles de Secundaria obligatoria y Bachillerato, intentaríamos comprobar si existía realmente esta tendencia de aumento de los conceptos alternativos según se avanza en los niveles de estudio.

Para indagar sobre estas cuestiones, diseñamos un cuestionario de preguntas muy básicas, la mayoría de ellas de tipo test, e intentamos comprobar si esta afirmación de Cañal era correcta. De esta manera, en el momento en el que definimos los objetivos del estudio y diseñamos el cuestionario para recoger los datos de los estudiantes, los objetivos fueron los siguientes:

- Detectar la presencia o la ausencia de ciertos conocimientos previos, que se consideran cruciales para comprender el proceso de la fotosíntesis como, por ejemplo, la noción de que los gases son sustancias.
- Detectar la presencia de ciertos preconceptos en los estudiantes de niveles de Secundaria y Bachillerato; sobre todo aquellos relacionados con la idea de que la fotosíntesis se trata, básicamente, de un intercambio gaseoso.
- Comprobar si la afirmación de Cañal (2005), de que existe un aumento de algunos preconceptos a medida que aumenta la formación científica de los estudiantes, es cierta.

Al tratarse de un Trabajo Fin de Máster, la población a la que se le pasó los cuestionarios fue modesta, ya que solo accedimos a los estudiantes del centro educativo en el que realizamos las prácticas del Máster y a un grupo de Bachillerato de otro centro, ya que el primero no había niveles de Bachillerato. Los cuestionarios se pasaron a un total de 235 estudiantes divididos en 4 niveles académicos diferentes: 117 alumnos de 2º de la ESO, 31 alumnos de

4º de la ESO de la especialidad de letras, 55 alumnos de 4º de la ESO de la especialidad de ciencias (con la asignatura de biología) y 32 alumnos de 2º de Bachillerato de la especialidad de ciencias para la salud (con la asignatura de biología). La metodología del estudio, el cuestionario y el análisis de los resultados obtenidos se pueden leer en el Anexo I: Estudio previo. En esta parte, y a modo de introducción, expondremos brevemente algunos de los resultados y conclusiones que nos llevaron a definir unos objetivos más concretos para continuar con esta línea de investigación.

En el estudio previo obtuvimos diferentes distribuciones al comparar los errores y los aciertos entre los alumnos de diferentes cursos según las distintas preguntas. Encontramos que hay cuestiones sobre preconceptos que muestran un claro aumento en el porcentaje de acierto según avanzamos en el nivel académico de los estudiantes encuestados. Estas ideas alternativas, aunque siguieran presentes en los niveles de 2º de Bachillerato, y a veces en porcentajes bastante elevados, mostraban una evolución semejante a la esperada y deseada; iban disminuyendo a medida que aumentaba la formación en ciencias de los estudiantes. Estas cuestiones son las que podríamos asociar a ideas muy antiguas y a preconceptos cuyas causas son la transmisión de ideas tradicionales, como pueden ser que es peligroso dormir con plantas por la noche porque se puede acabar el oxígeno o que las raíces son la boca de las plantas. Tiene sentido que la educación y la formación científica tenga un efecto corrector sobre estas ideas ya que la propia experiencia personal y los conocimientos en otros modelos de organización, a parte del modelo animal, son suficientes para ir eliminando unas ideas, en principio, algo ingenuas.

Encontramos otro grupo de respuestas en las que observamos que disminuía el índice de error, aunque no de forma tan marcada como en las anteriores. Son cuestiones que asociamos a preconceptos un poco más complicados de erradicar porque se basan en la experiencia personal o en ideas que se repiten a menudo en los niveles de educación más bajos. Nos referimos a preconceptos como que la fotosíntesis es un tipo de respiración o que el abono

contiene los nutrientes que las plantas necesitan para crecer. Estas ideas muestran un porcentaje de error altísimo en los niveles de Secundaria y parecen corregirse ligeramente en Bachillerato, aunque su índice de error sigue siendo muy alto.

Por último encontramos un grupo de ideas alternativas que parecen aumentar a medida que los estudiantes avanzan en sus estudios en ciencias. Estas ideas parecen tener su origen en la propia formación en ciencias y, lejos de erradicarlas, la educación parece incentivarlas. Las cuestiones que mostraron esta evolución fueron las siguientes:

- 1) Las plantas por el día hacen la fotosíntesis y por la noche respiran.
- 2) La respiración y la fotosíntesis son procesos contrarios.
- 3) Solo las plantas de color verde realizan la fotosíntesis.

En el caso de la primera pregunta, en nuestro estudio, aumentaron los porcentajes de error desde el 52% de los alumnos de 2º de la ESO hasta el 69% de los de 2º de Bachillerato. La idea de que la fotosíntesis y la respiración son procesos contrarios se encontró en el 22% de los alumnos de 2º de la ESO y aumentó hasta alcanzar el 56% de los alumnos de 2º de Bachillerato. Y, por último, la idea de que solo las plantas de color verde realizan la fotosíntesis aumentó desde solo el 2,5% de los alumnos de 2º de la ESO hasta el 56% de los de 2º de Bachillerato. El origen y el aumento de estas ideas debe estar asociado al propio proceso de enseñanza y aprendizaje de la fotosíntesis, por lo que las causas y las soluciones deberían buscarse ahí.

El cuestionario también poseía alguna pregunta de respuesta abierta como por ejemplo decir la finalidad de la fotosíntesis o definir el término *nutrición autótrofa*. En ambas preguntas obtuvimos un gran número de alumnos que respondieron que las plantas fabrican su propio alimento gracias a la fotosíntesis y que esa era la característica propia de los seres autótrofos. Esta idea es una de las más repetidas en los libros de texto de Primaria y

Secundaria, y no solo es un preconceito por sí mismo sino que propicia la formación de otras ideas alternativas e incoherencias según se profundiza en los conocimientos de fisiología, bioquímica y ecología.

Una vez analizados los resultados obtenidos en este estudio y habiendo comprobado que también observábamos que algunas ideas erróneas aumentaban a medida que los estudiantes avanzaban en su formación académica, decidimos continuar investigando sobre el tema.

1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El problema que presenta el análisis de las causas que llevan a la formación y mantenimiento de tantas concepciones alternativas asociadas a la nutrición vegetal es que están interconectadas unas con otras, de manera que resulta complicado encontrar el origen o el posible punto de partida para cambiar esta situación.

Uno de los estudios más completos a este respecto está recogido en el libro *La nutrición de las plantas: enseñanza y aprendizaje* de Pedro Cañal (2005). Este trabajo analiza en profundidad la situación de la enseñanza y el aprendizaje de este tema en los niveles de E. Primaria y E. Secundaria llegando a proponer un modelo de enseñanza para la nutrición vegetal al final del libro. El cambio de modelo requeriría, pues, que los libros de texto y los profesores de estos niveles integraran los cambios que propone Cañal que, en líneas generales, se podrían resumir en los siguientes:

- Cambio en la temporalización de los contenidos. Propone no explicar conceptos antes de que los alumnos tengan los conocimientos previos necesarios para comprenderlos.
- Definición coherente y universal de los términos *nutriente* y *alimento*.

- Integración del resto de productos biosintetizados por las plantas que se consideran metabolitos primarios, dentro del proceso fotosintético para evitar incoherencias en los libros y las explicaciones como la aparición y la desaparición constante de las sales minerales según convenga.

Una pregunta que nos surgió a partir de la lectura de este trabajo fue cuáles son las dificultades o los impedimentos que existen para la adquisición de este nuevo modelo. Lo cierto es que uno de los problemas más graves para la comprensión de la nutrición vegetal es la falta de conocimientos previos necesarios en los estudiantes. Sin embargo, en líneas generales, los contenidos que se deben trabajar en cada curso y, en consecuencia, las temporalizaciones vienen bastante marcadas por las leyes educativas sobre las que los profesores o responsables directos de la educación tienen poco poder. Sin embargo, la utilización de un modelo lógico e integrador en la fotosíntesis que incluya la síntesis de todos los nutrientes orgánicos que la planta necesita para vivir es imprescindible para comprender el modelo de nutrición vegetal en su conjunto. Pero según Cañal, los libros de texto de E. Primaria y E. Secundaria solo contemplan la síntesis de azúcares, en particular de la glucosa. Esta idea muestra una enorme incoherencia con el papel de los vegetales en los ecosistemas como productores primarios y como los organismos que introducen la energía del Sol en las cadenas tróficas produciendo biomasa ya que los tejidos vegetales poseen, además de azúcares, muchos otros compuestos orgánicos como proteínas, ácidos nucleicos y lípidos.

Para empezar a dar una visión global e integradora de la fotosíntesis se necesitaría que los profesores de Secundaria y Bachillerato tengan unas bases de conocimientos sobre la nutrición vegetal correctas y que los manuales especializados en fisiología vegetal ofrecieran esta visión integradora, ya que estos pueden considerarse la base del conocimiento para cualquier persona que busque información completa y correcta. Si los profesores de biología de

estos niveles académicos no tienen una visión coherente de la nutrición vegetal, jamás podrán transmitírsela a sus estudiantes; pero si los manuales especializados no estuvieran bien organizados y no ofrecieran una visión correcta y global del proceso de fotosíntesis (como pieza clave y diferencial de la nutrición vegetal con respecto a la animal), ni los profesores, ni los autores de los libros de texto podrían corregir sus posibles errores.

Así que en el momento en el que planteamos el estudio de esta investigación definimos los siguientes objetivos generales:

1. Describir y analizar las concepciones de los alumnos del Máster Universitario en Formación del Profesorado de ESO y Bachillerato de Biología y Geología de la Universidad Complutense de Madrid acerca de la nutrición de las plantas.
2. Analizar la propuesta didáctica de los cinco manuales de fisiología vegetal más relevantes y utilizados por los estudiantes universitarios de biología en Madrid con respecto al tema de la fotosíntesis. Comprobar si estos libros ofrecen una visión integradora y global del proceso fotosintético.
3. Evidenciar las dificultades, las confusiones, los obstáculos y los conceptos en construcción relacionados con la enseñanza y el aprendizaje del concepto de la fotosíntesis.

1.7. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

En el capítulo 1 hemos mostrado una visión general del trabajo a modo de introducción.

En el capítulo 2 (Marco teórico) se presenta un repaso de los trabajos, investigaciones y conclusiones sobre el tema de la nutrición vegetal y la

fotosíntesis en lo referente a dos aspectos muy diferentes. Por un lado se hace un recorrido histórico a través de la evolución que ha sufrido la concepción de la nutrición vegetal a lo largo de la historia mediante los diferentes estudios e investigaciones en disciplinas como la biología, la fisiología vegetal, la química y otras ciencias. Por otro lado se destacan las particularidades que tiene el proceso de enseñanza-aprendizaje de este tema, para posteriormente relacionar el desarrollo histórico y el educativo. Entre estas dos visiones, se genera un marco teórico sobre el que plantear las preguntas de este trabajo.

En el capítulo 3 (Metodología de estudio) se exponen los procedimientos y el método que hemos utilizado para el desarrollo de este trabajo, planteando el problema y los objetivos de la investigación e incluyendo el diseño del estudio con la descripción de las muestras y del instrumento utilizado.

En el capítulo 4 (Resultados y discusión) se muestran los resultados de los análisis realizados en los manuales universitarios y de los cuestionarios pasados a los estudiantes del Máster de Formación del Profesorado de ESO y Bachillerato de Biología y Geología que estudiaron el Máster desde el curso 2011-12 hasta 2016-17 en la Universidad Complutense de Madrid, con el fin de responder a las preguntas planteadas en la investigación y reflexionar acerca de la situación actual y las posibilidades reales de mejorar la enseñanza y el aprendizaje de la nutrición vegetal.

En el capítulo 5 (Conclusiones) se ofrecen las conclusiones a las que hemos llegado a través de la investigación ofreciendo, además, un modelo de enseñanza de la fotosíntesis, a modo de propuesta que habría que poner a prueba y las posibles perspectivas de mejora del estudio.

Posteriormente, tras la bibliografía, se ofrecen dos anexos con el resumen del estudio previo que nos llevó a plantearnos las preguntas de la investigación y el cuestionario utilizado para el estudio de las ideas de los estudiantes del Máster

de Formación del Profesorado de ESO y Bachillerato de Biología y Geología de la UCM acerca de la nutrición vegetal y la fotosíntesis.

2. Marco teórico

Dentro de este capítulo se abordan aspectos de diversa índole sobre el tema de estudio, así como sus particularidades. En él se realiza un breve repaso de los abundantes trabajos, investigaciones y conclusiones sobre este tema en lo referente a dos aspectos muy diferentes:

1. Cómo se ha ido construyendo el conocimiento acerca de la nutrición de las plantas a lo largo de la historia. Se hace un recorrido histórico a través de la evolución que ha sufrido la concepción del proceso de fotosíntesis en el marco de la nutrición vegetal a lo largo de la historia mediante diferentes estudios en disciplinas como la biología, la fisiología vegetal y otras ciencias.
2. Qué particularidades tiene el proceso de enseñanza-aprendizaje de este tema a través de investigaciones y trabajos sobre las dificultades que conlleva la enseñanza de la nutrición vegetal y de la fotosíntesis, sus ideas alternativas, las causas, las propuestas didácticas, etc.

Entre estas dos visiones, se pretende generar un marco teórico sobre el que plantear las dudas y los objetivos de este trabajo.

Desde el principio de los tiempos, desde que el primer hombre dejó de ser recolector para ser agricultor, el tema de cómo crecen las plantas ha sido de gran interés para la humanidad (Azcón-Bieto, 2003). Mucho antes de que aparecieran los primeros escritos sobre este tema, ya se tenía gran cantidad de experiencia agrícola que, sumada a la mera curiosidad y observación del ser humano, acumulaba una gran cantidad de conocimientos. Y aunque siempre han sido de gran importancia, hoy en día los conocimientos sobre la fisiología vegetal se han convertido en una necesidad para una sociedad en busca de una solución para la conservación del medio ambiente, la preocupación por el abastecimiento de alimentos para una humanidad en constante desarrollo e interesada en el uso de las plantas en una ciencia puntera como puede ser la

ingeniería genética relacionada con los usos en la medicina o en la producción de metabolitos para farmacia.

Por otro lado, en las aulas, su estudio está reflejado en los currículos de muchos países (Köse, 2008). Además es un ejemplo perfecto de enseñanza integral ya que integra un gran número de conceptos para su comprensión y está relacionada con diversas materias, como la biología, la fisiología, la ecología, la química y la física, entre otras (Angosto y Morcillo, 2014). Sin embargo, a pesar de estar reconocido como un tema de gran importancia para los estudiantes, es también uno de los que encuentra mayores dificultades en su asimilación y comprensión dentro de la educación (Haslam & Treagust, 1987; Cañal, 1990; Cañal, 2005; Angosto, 2013), arrastrando una cantidad enorme de errores conceptuales, ideas alternativas y preconceptos, que parecen, en muchas ocasiones, imposibles de erradicar (Köse, 2008).

2.1. HISTORIA DEL CAMINO HASTA LA COMPRENSIÓN DE LA NUTRICIÓN VEGETAL

El repaso histórico tiene como objetivo mostrar cómo han evolucionado los conceptos con respecto al funcionamiento de las plantas y comprobar si existe alguna relación entre este desarrollo y su aprendizaje en las aulas.

En nuestro caso parece que el tema de la nutrición vegetal no escapa a la ya conocida relación entre el desarrollo histórico de la ciencia y la evolución del aprendizaje de los estudiantes (Brush, 1989). Sin embargo, es cierto que, aunque la evolución del concepto de la nutrición vegetal en la enseñanza, así como de los procesos asociados de respiración y fotosíntesis, guarda cierto paralelismo con la historia (Cañal, 2005), parece que según se profundiza académicamente en estos conceptos se va difuminando esta relación, que es al principio muy evidente.

Es importante recalcar la idea anteriormente expuesta de que mucho antes de que la fisiología vegetal naciera como ciencia ya se tenían muchos conocimientos, tanto a nivel agrícola como popular. Pero para que la fisiología vegetal pudiera desarrollarse, tuvo que ir ligada al avance de otra ciencia: la química. El desarrollo de las diferentes ideas sobre la composición de la materia iría muy ligada a la comprensión de cualquier proceso metabólico, como la fotosíntesis o la respiración, siendo necesario el descubrimiento de que había distintos compuestos en el aire, así como el establecimiento de su comportamiento y sus propiedades, lo que permitió formular las leyes fundamentales y aclarar estos procesos químicos y biológicos.

Sin embargo, es curioso de que a pesar de su gran importancia para formular las ideas básicas de estos procesos, para terminar de comprenderlos sería necesario romper precisamente con uno de los principios más importantes de la biología y la química: la idea de que átomo y la célula eran las unidades indivisibles de la materia y de la vida. Sin este paso jamás habría sido posible desarrollar por completo estos procesos y comprender su funcionamiento.

2.1.1. Primeras ideas: El nacimiento de una nueva ciencia

- Las plantas toman los alimentos del suelo de forma predigerida

Es imposible hablar de la historia de muchas ciencias sin nombrar al filósofo griego Aristóteles (384-322 AC). En lo que se refiere a la concepción de la materia, sus ideas fueron menos acertadas que las de Demócrito (460-370 AC) que se había acercado mucho más a las teorías atómicas actuales (Epstein & Bloom, 2004), pero, sin duda, sus ideas tuvieron muchísima mayor repercusión en su momento y resultaron un obstáculo para concebir las cosas de una manera diferente (Ledesma, 2000).

Aristóteles había llegado a la conclusión de que las hojas tenían la función de dar sombra a los delicados brotes de las plantas (Losada *et al.*, 1998). También dedujo, mediante observaciones, que los vegetales tomaban los alimentos de la tierra y, así, consideró que esta era un estómago gigante donde estaban los alimentos disponibles de forma predigerida (Losada *et al.*, 1998).

Estas ideas se mantuvieron durante siglos. Tuvieron que pasar casi 20 siglos para que el conocimiento sobre el funcionamiento de las plantas avanzara de este estancamiento.

- El alimento de las plantas es el agua

Tuvieron que pasar casi 2000 años para que alguien refutara de forma contundente la idea de Aristóteles de que las plantas obtienen su alimento de la tierra con el experimento del fisiólogo belga Van Helmont (1580-1644) con el que postuló que el agua era el "elemento" básico de la materia viva (Losada *et al.*, 1998; Ledesma, 2000). Él fue quien realizó los primeros experimentos cuantitativos sobre la nutrición vegetal:

"Tomé una maceta, en la cual coloqué 90,7 kg de tierra que había sido secada en un horno, la humedecí con agua de lluvia, y sembré en ella el tronco o tallo de un árbol de Sauce que pesaba 2,30 kg. Finalmente, después de 5 años de cuidados, el árbol había crecido y pesaba 76,74 kg. Cuando era necesario, siempre humedecía la tierra de la macetera con agua de lluvia o agua destilada. La macetera era grande y estaba implantada en la tierra. Para que el polvo de los alrededores no se entremezclara con la tierra, cubrí los bordes de la macetera con una placa de hierro cubierta con plomo y con muchos huecos. No computé las hojas que cayeron durante cuatro otoños. Al final sequé de nuevo la tierra que había en la macetera y se encontraron los mismo 90,7 kg, faltando 56,7 g. Por lo tanto, 75,7 kg de madera, corteza y raíces se formaron solamente del agua" (Ledesma, 2000, p. 281).

Aunque la conclusión fue completamente equivocada, poco podemos criticar a Van Helmont y a su diseño del experimento, que fue excelente en lo que se refiere al planteamiento científico: bien planeado, cuidadosamente hecho y cuantitativamente descrito (Losada *et al.*, 1998). Con estos experimentos fue pionero de esta nueva ciencia y hoy en día se le reconoce como uno de los padres de la fisiología vegetal.

Leonardo Da Vinci (1452-1519) había realizado un experimento similar pero no fue publicado y permaneció en sus libros de notas (Bodenheimer, 1958) (Epstein & Bloom, 2004). También Robert Boyle (1627-1691) describió experimentos parecidos con los que él llegó a la misma conclusión (Russell & Wild, 1988; Epstein & Bloom, 2004).

John Woodward (1665-1728), un profesor de medicina de Londres, destacó la importancia del agua mineral, al comparar la diferencia de crecimiento vegetal con agua destilada, concluyendo que parte del material terrestre entra en la planta mezclado y arrastrado por el agua, sirve para alimentar a la planta (Russell & Wild, 1988; Epstein & Bloom, 2004).

Desde que Van Helmont realizó sus experimentos hasta que se desentrañaron los conocimientos básicos acerca de la asimilación fotosintética del carbono tuvieron que pasar 100 años. En ese tiempo una idea fue la que marcó el pensamiento predominante sobre la nutrición y el funcionamiento de las plantas: la teoría del flogisto.

- Hay una porción del aire que contribuye a la nutrición de las plantas:
La Teoría del Flogisto

Stephen Hales (1677-1761) en 1727 publicó *Vegetable Staticks* que fue el primer libro de la historia en describir y discutir un número substancial de

experimentos de fisiología vegetal. Hales era un clérigo inglés al que le apasionaban las medidas exactas y la cuantificación experimental. El título del libro revela el dominio que las ciencias físicas poseen sobre el conocimiento de la vida. Por ello no es trivial que Hales llame así a una obra que asentó el fundamento para el nacimiento de la fisiología vegetal (Ledesma, 2000). Midió la cantidad de agua absorbida y la transpirada lo que le lleva a deducir que es precisamente esa transpiración el motor de la circulación del agua y la savia por la planta (Cañal, 2005); calculó las velocidades relativas del movimiento del agua en el interior de las plantas según las medidas de superficie radicular y foliar; realizó numerosos experimentos sobre la presión radicular y los ilustró y describió tan minuciosamente que algunos de los experimentos descritos en este libro aún se repiten en algunos laboratorios (Ledesma, 2000) y cualquier investigador moderno no encuentra problemas a la hora de repetirlos fielmente (Epstein & Bloom, 2004).

Observando la salida de agua como vapor, llega a pensar en la posibilidad de que la planta sea capaz de captar vapor o gases, respirando como los animales: *“(...) el aire es un fluido transparente y elástico, formado por partículas de naturalezas muy diferentes, y el gran creador de la Naturaleza lo ha ajustado admirablemente para que sea el soplo de la vida, de los vegetales y de los animales, sin el cual no se podría vivir, ni podrían crecer los animales”*. (Cañal, 2005, p. 21). Avanzando en esta idea, fue el primero en concluir experimentalmente que hay una porción de aire que contribuye a la nutrición vegetal, por lo que es conocido, junto a Van Helmont, como padre de la fisiología vegetal (Losada *et al.*, 1998). Afirmó: *“Con mucha posibilidad, las plantas obtienen alguna parte de su alimento a partir del aire, a través de sus hojas (...). Quizás la luz, entrando también libremente a través de la superficie de las hojas y las flores, contribuya mucho a ennoblecer los principios vegetales”* (Cañal, 2005, p. 21). Creía que la luz se transmutaba en algo del cuerpo del vegetal. Cultivaba plantas en macetas y protegía la tierra contra la evaporación por medio de una cubierta y pesaba diariamente; de aquí concluyó categóricamente que las hojas eran la sede de la transpiración, la cual ocurre

bajo la influencia de la luz y el calor del sol (Singer, 1947; Nordenskiöld, 1949; Guyénot, 1956). Por tanto, también fue el primer científico en apreciar el efecto directo de la luz solar en la nutrición vegetal. Hales había estudiado en Cambridge y fue profundamente influenciado por Newton sobre la luz, cuyos “corpúsculos elementales” (que denominamos fotones), podían transferir energía a los cuerpos (Losada *et al.*, 1998). Boyle también influenció mucho a Hales, quien ignoró los experimentos de Van Helmont acerca de los gases (Nordenskiöld, 1949), aunque probó, con ayuda de la bomba neumática, que el aire no solo penetra en la planta por las hojas, sino también por la corteza (Singer, 1947; Ledesma, 2000).

Hales, como muchos otros en aquel momento, creía en la “Teoría del Flogisto”, publicada por primera vez por Stahl, G. E. (1660-1734) en 1697, donde se postula, en esencia, la existencia de un mismo principio inflamable en todos los combustibles, el flogisto, que se libera, cuando arden esas sustancias (Cañal, 2005). Esta primera exposición de Stahl sería desarrollada, completada y defendida por muchos investigadores durante muchos años.

Había nacido una nueva ciencia y las dos ideas principales de Hales marcaban un buen punto de inicio. Sin embargo, los británicos, maestros del sarcasmo y la ironía, no podían aceptar así como así que las plantas captan y almacenan la luz del sol. El famoso escritor Swift (1667-1745) ridiculizó estas ideas de forma despiadada en su aclamado libro *Gulliver's travels* (1726). Pero la imaginación sarcástica de la que hizo gala el autor en este libro se vería ampliamente desbordada por las evidencias unos años más tarde (Losada *et al.*, 1998).

Cabe destacar que a pesar de esta circunstancia, ni la biología, ni mucho menos la fisiología, eran aún una ciencias constituidas, aunque estaba en proceso. Se seguía manteniendo una recurrencia notable hacia nociones anteriores como por ejemplo que la tierra era el origen del material del cuerpo de la planta (Ledesma, 2000). Duhamel du Monceau en 1758 decía: “Muchos

físicos han creído que los órganos que llevan a cabo la primera transformación de la savia, residen las mismas plantas (...) me parece más natural creer que la primera preparación de la savia se hace en la misma tierra (...) el estómago de los vegetales está en la tierra; las raíces hacen mediante su desarrollo el papel de vías lácteas (vasos linfáticos)” (Guyénot, 1956).

Así que desde este momento empezó un nuevo periodo en la historia del estudio de los procesos de la nutrición vegetal, cuyo punto álgido sería la formulación teórica de los procesos de respiración y fotosíntesis en 1804.

2.1.2. Un siglo de estudio de los procesos de respiración y fotosíntesis hasta su formulación química

- La teoría del flogisto aún vigente y fuerte

A partir del desarrollo de las primeras ideas de la Teoría del flogisto, Joseph Priestley (1733-1804) fue un destacado científico, teólogo y filósofo que publicó más de 150 obras. Fue el primero en establecer en 1771, que las plantas purifican el aire, al contrario de lo que hacen los animales, que lo vician (Losada *et al.*, 1998). Aísla y caracteriza el oxígeno, calentando óxido de mercurio, al que denomina “aire desflogisticado”, y comprueba que las plantas emiten ese mismo gas, dando el primer paso hacia la clarificación del proceso de fotosíntesis (Epstein & Bloom, 2004). Descubre que las plantas verdes, en vez de afectar al aire del mismo modo que la respiración de los animales, revierten el efecto producido por los mismos, es decir, en sus términos, la planta desflogista el aire viciado por los animales (Cañal, 2005). Cabe atribuirle a él la idea de que la “respiración” de los vegetales es de naturaleza inversa a la de los animales (Cañal, 2005); idea que sigue causando muchos problemas hoy en día en las aulas y que parece una de las más complicadas de erradicar del pensamiento popular acerca de los vegetales (Angosto & Morcillo, 2015).

Para Priestley, el aire seguía siendo una sustancia simple. El oxígeno era tan solo aire atmosférico que había cedido su flogisto y el nitrógeno era la porción de aire atmosférico que no podía ser separado de su flogisto (Cañal, 2005). Curiosamente, años antes, dos investigadores habían estado trabajando sobre este mismo tema llegando a conclusiones opuestas acerca de la composición del aire atmosférico. Joseph Black (1728-1799), un médico, físico y químico escocés, había aislado el dióxido de carbono, denominándolo “aire fijo” y había demostrado que se encuentra siempre en una pequeña proporción del aire atmosférico (Cañal, 2005); y Carl Wilhelm Scheele (1742-1786), químico sueco famoso por sus investigaciones en farmacia, había descubierto el oxígeno y había descrito el aire como la mezcla de dos gases: aire ígneo y aire viciado, interpretando también sus descubrimientos en base a la Teoría del flogisto: *“El flogisto, verdadero elemento, puede transmitirse de un cuerpo a otro; cuando se combina con el aire ígneo da el calórico. El calórico, a lo largo de la combustión o la respiración, se adhiere al aire viciado y lo vuelve más ligero (...)”* (Cañal, 2005, p. 23). Sin embargo, las ideas de éste último aún no habían sido publicadas cuando Priestley dedujo las suyas acerca de este tema y Priestley tuvo una mayor repercusión en el mundo científico; siendo lo más importante su aportación sobre la acción de las plantas sobre el “aire viciado”. Sin embargo la acción de la luz le pasó desapercibida.

Fue el holandés Jan Ingenhousz (1730-1799) el que, impresionado por el descubrimiento de Priestley, alquiló una casa de campo cerca de Londres en el verano de 1779 y realizó más de quinientos experimentos rigurosos que publicó inmediatamente en su libro *Experiments Upon Vegetables, Discovering Their Great Power of Purifying the Common Air in the Sun-shine, and of Injuring it in the Shade and at Night* (Gest, 1997; Ledesma, 2000). En él concluyó que los tallos y las hojas verdes de las plantas poseen un gran poder de purificar el "aire malo", pero solo cuando están expuestas a la luz del sol y según la claridad del día (Asimov, 1988; Gest, 1997; Losada *et al.*, 1998, Ledesma, 2000). Por tanto, Ingenhousz fue el descubridor de la relación entre la

producción de oxígeno y la exposición a luz en las plantas aunque, al igual que Priestley, malinterpretó los resultados (Epstein & Bloom, 2004).

Entre sus principales contribuciones manejó del concepto de *equilibrio en la vida animal y vegetal* (Ledesma, 2000) gracias a su demostración de que al exponer las partes verdes de la planta a la luz, fijan el anhídrido carbónico atmosférico y el proveniente de la descomposición de los animales y plantas muertos, lo cual establecía un equilibrio entre los dos mundos, el animal y el vegetal (Singer, 1947; Ledesma, 2000). Ingenhousz demostró que las plantas obtienen todo su carbono a partir del gas carbónico de la atmósfera: *“Las partes verdes de las plantas absorben a la luz solar el carbono, a partir del ácido carbónico, desprendiendo solo el oxígeno y conservando el carbono para su nutrición”*. Así afirma que solo las partes verdes producen el “agente purificador” y los tejidos no verdes, en cambio, contaminan el aire (Epstein & Bloom, 2004). También añadió que las plantas contaminan el ambiente con “aire nocivo” tanto en la luz como en la oscuridad, pero cuando están iluminadas el desprendimiento de “aire depurado” excede a su consumo (Losada *et al.*, 1998). A él le debemos la idea de que las plantas de interior, en la oscuridad, envenenan el aire y por ello las plantas y flores deben eliminarse de los dormitorios por las noches; idea que se considera hoy en día uno de los preconceptos más característicos de los estudiantes acerca de las funciones vitales de las plantas (Cañal, 1990; Charrier & Obenat, 2001; Cañal, 2005; Kose, 2008; Angosto & Morcillo, 2015). También merece la pena destacar que en el siglo XVIII ya se sabía que las plantas respiran durante todo el día, algo que a mucha gente hoy en día le cuesta asimilar y que los estudiantes retienen con mucha dificultad (Cañal, 2005; Köse, 2008; Angosto & Morcillo, 2015).

Ingenhousz se percató de algo que Priestley dejó pasar e hizo avanzar tres pasos en el camino al conocimiento de la fotosíntesis:

- La luz era necesaria en ese proceso.
- En realidad solo las partes verdes de la planta llevan a cabo la fotosíntesis.
- Todas las partes vivientes de las plantas respiran.

Por todo esto, podemos plantear la siguiente ecuación como resumen de las conclusiones de Priestley e Ingenhousz (Ledesma, 2000):

Plantas

Aire fijo + Luz \longrightarrow Sustancia flogisticada en la planta + Aire desflogisticado

Pocos años más tarde, en 1782, el clérigo de la ciudad de Ginebra, Jean Senebier (1742-1809), publicó su obra llamada *Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière solar* (Singer, 1947) sobre la capacidad de reino vegetal para restaurar el aire por influencia de la luz solar, haciendo notar que el "aire fijado", o *ácido carbónico*, es el nutriente que las plantas utilizan para la formación de sustancias carbonadas; y también es la fuente del "aire puro", u *oxígeno*, que liberan (Losada *et al.*, 1998). Encontró que las cantidades de oxígeno liberado por las hojas verdes sumergidas en el agua, era proporcional a la concentración de dióxido de carbono disuelto en el agua (Epstein & Bloom, 2004). Por supuesto, al igual que sus predecesores, no utilizó los términos "oxígeno" y "dióxido de carbono" sino "aire deflogisticado" para denominar al primero y "aire fijado" para el segundo (Epstein & Bloom, 2004), manteniendo así viva la teoría del flogisto durante sus últimos años.

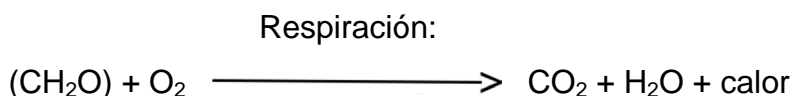
Así, podemos comprobar que, con el tiempo, se había olvidado la idea de que el agua era el elemento esencial; las investigaciones se centraban en la concepción de que todos los productos de estos procesos parecían estar relacionados exclusivamente con el dióxido de carbono.

Aunque hoy en día la teoría del flogisto pueda parecer más cercana a las ideas aristotélicas de los elementos que a la química moderna, hay que tener en cuenta que en aquella época aún se desconocía la naturaleza y la composición de la materia. Por lo tanto no se sabía la composición de los gases, lo que dificultaba enormemente la comprensión de estos procesos.

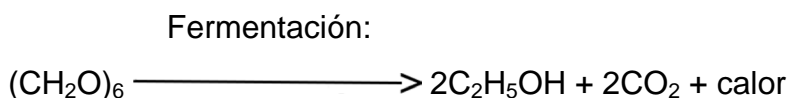
- Avance de la química y fin de la teoría del flogisto

Serían los estudios de Antoine Lavoisier los que aclararían definitivamente, en la década de 1780, la química y la energética de la respiración y su semejanza con la calcinación y la combustión. Concluyó que el consumo de oxígeno durante la respiración aumenta con el ejercicio físico y que no solo el carbono contenido en las sustancias orgánicas se puede combinar con el oxígeno para dar ácido carbónico, sino también el hidrógeno para dar agua: *"Independientemente de la porción de aire vital que se convierte en ácido carbónico , una porción de la que entra en los pulmones no vuelve a salir en el mismo estado; de lo cual que en el acto de la respiración resulta una de dos, o que una porción de aire vital se une con la sangre, o bien que se combina con una porción de hidrógeno para formar agua".* (Losada et al., 1998, p. 312).

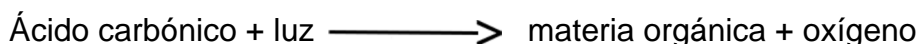
La ecuación de la respiración quedó pues claramente definida por Lavoisier, aún antes de que Dalton hubiese formulado su teoría atómica y de que Berzelius hubiera asignado símbolos a los elementos (Losada et al., 1998). En términos químicos modernos podríamos expresarla:



Además, a Lavoisier le debemos la primera ecuación química de la fermentación (la primera en la historia de la química) que hoy podemos escribir también en los siguientes términos (Losada *et al.*, 1998):



Así, Lavoisier, con su revolucionario libro *Traité Élémentaire de Chimie*, comenzó verdaderamente con la química moderna. Aclaró que el aire deflogisticado que liberan las plantas era en realidad oxígeno y que el aire fijo es el dióxido de carbono, el cual demostró, en 1781, que estaba formado por carbono y oxígeno (Ledesma, 2000). Poco después, en 1784, un físico y químico británico, Henry Cavendish (1731-1810), demuestra que el agua es un compuesto de hidrógeno y oxígeno (Baker & Allen, 1970). A partir de este momento, el proceso de la fotosíntesis pudo ser visto en un nuevo contexto (Gest, 1997):



Lavoisier, sin embargo, se equivocó en su conclusión de que la respiración animal tiene lugar en los pulmones, donde se genera el calor que el proceso respiratorio conlleva: *"La respiración es, por tanto, una combustión, en verdad muy lenta, pero por otra parte totalmente semejante a la del carbono, y se efectúa en el interior de los pulmones sin originar luz porque la materia del fuego liberada es inmediatamente absorbida por la humedad de estos órganos. El calor desarrollado en esta combustión se comunica a la sangre que atraviesa los pulmones, y de ahí se extiende por todo el sistema animal."* (Losada *et al.*, 1998, p. 312).

Su ayudante Jean Henri Hassenfratz, que lo fue después de Lagrange, dio una opinión discordante con su maestro respecto a este tema, en el sentido de que, si el calor de la respiración se liberase completamente en el pulmón, la

temperatura local de este órgano debería ser mucho más alta que la del resto del cuerpo, lo cual estaba en contradicción con los hechos (Losada *et al.*, 1998).

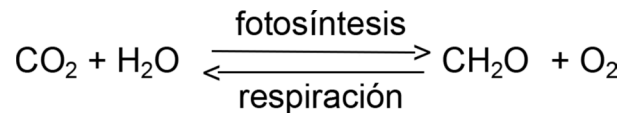
En cualquier caso, los trabajos de Lavoisier sobre el calor pusieron los cimientos de la termodinámica, tanto en sus aspectos teóricos como prácticos. Sus principales trabajos en este campo fueron efectuados con Pierre-Simon Laplace (1749-1827) y Édouard Séguin (1812-1880) que, a pesar de no dar crédito al químico escocés Black, verdadero fundador de la calorimetría, fabricaron un calorímetro mucho más perfecto que el de éste; lo que les permitió realizar importantes medidas para determinar no solo el calor que se produce en las reacciones químicas (midieron el calor producido en la disolución del ácido sulfúrico en agua, detonación del salitre con carbón y la combustión del fósforo) sino, también, el calor que se genera en los procesos fisiológicos como la respiración de una cobaya (Losada *et al.*, 1998).

Los avances en el reconocimiento de la composición del anhídrido carbónico y del agua, así como de que las sustancias orgánicas (azúcar, alcohol, aceite, cera, etc) se componen de carbono, hidrógeno y oxígeno, permitió a Lavoisier establecer su análisis elemental, quemándolas y pesando los sustratos y los productos de la combustión. Este paso fue fundamental para el avance en la comprensión de los procesos metabólicos fundamentales. Así, Ingenhousz, en su libro *Essays on the food of plants and the renovations of soils*, publicado en 1796, utilizó la nueva nomenclatura de Lavoisier para reformular sus ideas acerca de la función de las plantas. Y finalmente, en 1804, el químico de Ginebra Theodore De Saussure (1767-1845), encontraría, tras realizar rigurosas medidas cuantitativas, el cuarto y último componente de la fotosíntesis: el agua, cuya participación en el proceso había quedado enmascarada por el interés que recibió durante años el estudio del papel del CO₂, y corroborando así, en cierto modo, los experimentos originales de Van Helmont que, dos siglos antes, le habían llevado a concluir que el agua era el elemento clave de este proceso (Losada *et al.*, 1998). De Saussure demostró

que, mientras asimilan el dióxido de carbono, las plantas aumentan su peso en una cantidad mayor de la que pueden obtener de este gas y concluyó que se apoderan del hidrógeno y del oxígeno del agua, que pierde así su estado líquido.

Sin embargo, De Saussure enfatizó que el oxígeno desprendido por las plantas procedía del CO_2 y no del H_2O , relegando al agua a un papel relativamente secundario del proceso: *"Las plantas se apropian de los elementos hidrógeno y oxígeno del agua. En ningún caso, sin embargo, las plantas descomponen directamente el agua al asimilar el hidrógeno y desprender el oxígeno como gas. Nunca liberan oxígeno excepto como consecuencia de la descomposición directa del ácido carbónico"* (Losada *et al.*, 1998, p. 314); a pesar de que antes, uno de los primeros seguidores de Lavoisier, Claude Louis Berthollet (1748-1822), mediante un experimento concluyó que el origen del oxígeno desprendido tenía que ser forzosamente el agua (Baker & Allen, 1970).

Aunque la concepción de que el oxígeno desprendido por las plantas proviene del agua tuvo que esperar, lo cierto es que con todas estas cuestiones quedaba aparentemente explicado en términos químicos globales, aunque no energéticos ni bioquímicos, el ciclo de la fotosíntesis-respiración de las plantas y los animales, al purificar aquéllas en la fotosíntesis el aire de la atmósfera viciado por éstos en la respiración (Losada *et al.*, 1998). De esto se concibió, en esencia, que el proceso fotosintético sería el proceso inverso a la respiración, una idea errónea de base (Cañal, 2005; Angosto, 2013) que aunque pueda parecer útil dentro del contexto de la didáctica, será una de las ideas que más problemas cause a la hora de comprender estos procesos por parte de los estudiantes (Cañal, 2005; Köse, 2008), apareciendo resumida en una fórmula de flechas inversas, incluso en los libros de texto (Angosto, 2013) o por parte de licenciados o graduados en biología que se están formando como docentes (Angosto & Morcillo, 2015).



En lo que se refiere a la historia, esta idea, aunque bastante general en principio, fue de gran importancia ya que sirvió de base en la que apoyarse a partir de ese momento y en la que profundizar. Como resumen podríamos decir que había sido ya descubierta por Priestley y Lavoisier, y, finalmente, fue completada por Senebier y De Saussure.

2.1.3. Camino a una comprensión más profunda: Orgánulos y pigmentos fotosintéticos, desarrollo de la química, bioenergética de la luz y estudio de la fermentación.

Tras llegar a la ecuación global de la fotosíntesis, los estudios sobre este proceso se expandieron y diversificaron hacia caminos más específicos y separados. Podríamos encontrar cuatro líneas de investigación que estuvieron estrechamente relacionadas con la clarificación de este proceso:

- El estudio de las células: los tipos celulares, sus orgánulos y pigmentos.
- Avance de algunos conocimientos químicos básicos para la comprensión de cualquier proceso bioquímico: consolidación de la estequiometría y estudio de los factores limitantes.
- El estudio de la luz y de su bioenergética: cómo es el funcionamiento de la luz y su aprovechamiento por parte de la célula.
- Desarrollo de la comprensión de otro proceso metabólico más sencillo y conocido desde la antigüedad: la fermentación. Al ser un proceso metabólico cuya función es la obtención de energía, su

esclarecimiento sería de gran ayuda a la comprensión de la respiración y la fotosíntesis.

- Estudio de los cloroplastos y de los pigmentos fotosintéticos

El "pigmento verde de las hojas", fue aislado en 1817 por los farmacéuticos y químicos orgánicos franceses Pierre Joseph Pelletier (1788-1842) y Joseph Bienaimé Caventou (1795-1877) y le pusieron el nombre de clorofila (Ledesma, 2000). Mediante la extracción con disolventes suaves consiguieron también aislar de las plantas numerosas drogas (cafeína, estricnina, quinina, colchicina, etc.), por lo que se les considera fundadores de la química de los alcaloides. En 1865, el fitofisiólogo alemán Ferdinand Gustav Julius von Sachs (1832-1897) estableció que la clorofila no se distribuye uniformemente por la planta sino que se localiza en los orgánulos celulares denominados "cuerpos clorofílicos", más tarde conocidos como cloroplastos. Sachs demostró que la asimilación fotosintética del dióxido de carbono por las plantas ocurre en los cloroplastos y conduce a la síntesis de almidón. Cuando a Sachs le objetaron que los cloroplastos solo pueden realizar la función clorofílica "dentro" de la célula viva y que, en consecuencia, no deben ser considerados como los orgánulos de la asimilación del carbono, replicó que ello era equivalente a decir que el ojo no es el órgano de la visión porque no puede ver cuando está "fuera" de la cuenca ocular. Sachs confirmó también la conclusión de Ingenhousz de que las plantas, al igual que los animales, respiran, consumiendo oxígeno y desprendiendo dióxido de carbono (Losada *et al.*, 1998).

También el fisiólogo y botánico alemán Theodor Wilhelm Engelmann (1843-1909) demostró que el desprendimiento de oxígeno por parte de las plantas durante la fotosíntesis se debe a la absorción de la luz por la clorofila y que tiene lugar, efectivamente, en los cloroplastos. Además puso de manifiesto la correspondencia entre el espectro de acción de la fotosíntesis y el espectro de

absorción de la clorofila, estableciendo que la luz roja y azul que absorbe el pigmento son las únicas que promueven activamente el proceso (Losada *et al.*, 1998). También fue responsable de otro descubrimiento insólito en 1883, el de las bacterias fotosintéticas purpúreas, que no producen oxígeno durante la fotosíntesis. En lo que se refiere al aprendizaje, este descubrimiento tiene una relevancia importantísima a la hora de darle a la fotosíntesis el papel que le corresponde como proceso de reciclado de la materia (responsable de la síntesis de materia orgánica) y apartarlo de la idea fundamental y globalizada, excepto para los expertos en el tema, de que la finalidad de la fotosíntesis es la producción de oxígeno.

Engelmann hizo otro descubrimiento fundamental en 1881, cuya importancia no fue entonces debidamente valorada: el desprendimiento de oxígeno molecular por preparaciones de cloroplastos aislados de ciertas plantas.

- Descubrimientos químicos básicos para la comprensión del proceso

El mineralogista y químico francés Jean-Baptiste Boussingault (1802-1887), descubridor de la fijación del nitrógeno atmosférico por las leguminosas y autor de un texto sobre química agrícola en ocho volúmenes, hizo en 1864 el descubrimiento de que el *cociente fotosintético*, (relación entre el volumen de oxígeno desprendido y el de dióxido de carbono absorbido) es igual a la unidad: $O_2/CO_2=1$ (Losada *et al.*, 1998) aunque esta idea ya había sido sugerida por Lavoisier y De Saussure (Spoehr & McGee, 1923).

En 1905, el fitofisiólogo inglés Frederick Frost Blackman (1866-1947) publicó su trabajo *Optima and limiting factors*, en el que ponía de manifiesto que, cuando un proceso depende de varios factores independientes, como son la intensidad de la luz, concentración de CO_2 , temperatura, etc. en la fotosíntesis, su velocidad está limitada por el paso más lento, o "factor limitante". También demostró que la temperatura incrementa notablemente la actividad fotosintética

cuando hay intensidades de luz altas, pero que cuando son bajas no ejerce ningún efecto (Losada et al., 1998).

- Estudios sobre la bioenergética de la luz

La *función energética de la luz* en la fotosíntesis, que había sido intuita por Hales, que a su vez se había inspirado en las teorías de Newton, y que había sido demostrada después por Ingenhousz, fue finalmente aclarada en 1845 por Julius von Mayer (1814-1878), tres años más tarde de enunciar el principio de conservación de la energía: *"Las plantas son capaces de absorber y convertir la energía pero no de crearla. La naturaleza se ha impuesto a sí misma la tarea de cómo cazar al vuelo la luz que fluye hacia la Tierra y de almacenar la más elusiva de todas las energías de forma estable. Para conseguir este propósito ha cubierto la corteza de la Tierra de organismos que en sus procesos vitales absorben la luz del Sol y utilizan su energía para producir continuamente una acumulación de diferencia química. Estos organismos son las plantas; el reino vegetal constituye la despensa en que los fugaces rayos solares son fijados y almacenados para su uso posterior: una medida económica providencial a la que va inexorablemente unida la propia existencia física de la raza humana"* (Losada et al., 1998, p. 317).

El físico austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906), en 1866, familiarizado con el segundo principio de la termodinámica y con la mecánica estadística, expresó la importancia del proceso de conversión de energía de la fotosíntesis en los siguientes términos: *"La lucha universal por la existencia en el mundo vivo no es una lucha por las materias primas - ya que todos los organismos las pueden encontrar en abundancia en el aire, agua y suelo -, sino una lucha por la entropía disponible en la transferencia de energía del Sol caliente a la Tierra fría. Las plantas verdes extienden la enorme superficie de sus hojas para aprovechar al máximo esta transición y convierten, por medio de procesos aún desconocidos, la energía del Sol, antes de que se enfríe a la temperatura de la*

Tierra, en energía química. Las síntesis químicas que tienen lugar son aún un misterio para nosotros en nuestros laboratorios, y los productos de estas cocinas químicas constituyen el botín por el que pelea el mundo animal" (Losada *et al.*, 1998, p. 317).

- Estudios sobre la fermentación

Que la fermentación alcohólica es un proceso biológico fundamental llevado a cabo por organismos vivos fue descubierto de forma independiente por el fisiólogo alemán Theodor Schwann (1810-1882), padre de la teoría celular, en 1836 y por el fisiólogo e ingeniero francés Charles Cagniard de la Tour (1777-1859) en 1822. Ambos científicos propusieron que la conversión del azúcar en alcohol y dióxido de carbono es una función fisiológica de la levadura, que aparece como planta microscópica durante la fermentación.

Ya en 1835, Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) había formulado la teoría de que todas las reacciones que ocurren en los organismos vivos son llevadas a cabo por catalizadores biológicos. Pero el trabajo de Schwann fue duramente atacado por algunos de los más famosos químicos de la época, Justus von Liebig (1803-1873) y Friedrich Wöhler (1800-1882), quienes mantuvieron que la fermentación, así como la putrefacción, eran procesos puramente químicos. Los trabajos de Schwann sobre la dependencia de la fermentación y la actividad de las células vivas de la levadura quedó parado y no fue reivindicado hasta la década de 1850 por Louis Pasteur (1822-1895) (Losada *et al.*, 1998).

En la historia de la bioquímica es famosa la disputa que mantuvieron Liebig y Pasteur sobre la naturaleza de las fermentaciones, pero fue este último el que con su perseverancia y entrenado en su carrera como químico, convenció finalmente al mundo científico de que todos los procesos son el resultado de la actividad biológica de los microbios (Losada *et al.*, 1998). En 1856 inició sus trabajos sobre la fermentación láctica de la leche, demostrando que la

formación de ácido láctico requería también la presencia de microorganismos, aunque diferentes de los que son necesarios para que se produzca la fermentación alcohólica.

Estudiando y experimentando con la fermentación, Pasteur descubrió en 1861 otro fenómeno biológico fundamental: la existencia de formas vivas que pueden vivir en ausencia de oxígeno libre. En contraste con las levaduras y las bacterias lácticas, las bacterias de la fermentación butírica solo pueden vivir en ausencia de oxígeno molecular, gas considerado hasta entonces esencial para la vida. Fue Pasteur el que introdujo los términos *aerobiosis* y *anaerobiosis* para designar la vida en presencia y en ausencia de oxígeno respectivamente. Fue, también, el primero en comprender que *la fermentación es vida sin aire*, así como *la respiración es vida con aire* y que ambos procesos son esenciales para la obtención de energía fisiológica (Losada *et al.*, 1998). Los organismos facultativos tendrían la capacidad de utilizar "alternativamente" ambos mecanismos para obtener su energía y los anaerobios obligados dependerían de la fermentación. Sin embargo, la mayoría de los organismos son aerobios, y utilizan el oxígeno libre para oxidar los compuestos orgánicos de los que se alimentan a dióxido de carbono y agua. Pasteur, con su habitual clarividencia, demostró que, en ausencia de aire, la levadura transforma el azúcar en alcohol y dióxido de carbono, mientras que, en presencia de aire, no se forma alcohol, o muy poco, siendo el dióxido de carbono el principal producto de la reacción. Además, también fue el primero en demostrar que para una misma cantidad de azúcar, el crecimiento de la levadura es sustancialmente menor en condiciones anaerobias por lo que se deduce que la fermentación es un proceso mucho menos eficaz para la obtención de energía que la respiración.

Pero para que la ciencia pudiera avanzar tuvo que comenzar el estudio a niveles inferiores de organización de la materia, lo que obligó, prácticamente, a romper las fronteras demostrando que las unidades estructurales y funcionales indivisibles de la materia y de los seres vivos, los átomos y las células respectivamente, eran, a su vez, susceptibles de disociación y fragmentación.

2.1.4. Comienzo de una nueva etapa: fragmentación de las unidades básicas de la materia y de la vida

Aunque las ideas de Lavoisier sobre la fermentación, respiración y fotosíntesis, postuladas a finales del siglo XVIII, marcaron un hito en la historia de la bioenergética, los químicos no pudieron avanzar a fondo en el esclarecimiento del mecanismo de estos procesos hasta un siglo más tarde, cuando la integridad de la célula y de los átomos dejaron de ser un obstáculo para investigar a niveles más inferiores, y el calor, la electricidad, el magnetismo, la luz y la energía química y nucleares empezaron a dejar de ser un misterio para los científicos (Losada *et al.*, 1998).

Resulta paradójico que la química biológica moderna naciera a finales del siglo XIX al demostrar que un proceso fisiológico como la fermentación alcohólica, conocido desde tiempos antiguos, puede ocurrir al margen de la célula viva, después de destruir la estructura y la integridad celular. En este aspecto, hay un claro paralelismo con el nacimiento de la Química moderna, al conseguir los físicos dissociar el átomo mediante descargas eléctricas y las partículas subatómicas. Esta ruptura de una de las ideas más sólidas de la ciencia hasta el momento no hizo derrumbarse, ni mucho menos, la esencia de la química ni de la biología, sino que más bien, las enriqueció y vigorizó enormemente (Losada *et al.*, 1998). Y con el desguace de átomos, moléculas y células comenzó una nueva etapa.

- Ruptura de las unidades estructurales y funcionales de la vida y de la materia, y nacimiento de la enzimología

Hasta aquel momento se había vivido una importante controversia sobre la acción y funcionamiento de los fermentos y se había llegado a una solución salomónica para distinguir entre los fermentos como los de la levadura, que

solo actúan en el interior de la célula viva y se denominaron "fermentos organizados" y los que trabajan fuera de la célula, como los digestivos, denominados "fermentos desorganizados". Está claro que existía una zona fronteriza ambigua entre estos conceptos. Este problema se resolvería a finales del siglo, cuando se esclarecieron los hechos definitivamente.

Claude Bernard (1813-1878) que se puso a investigar sobre ello en 1875 demostró que las células de levadura contenían el fermento invertasa, fermento soluble como los digestivos de animales y plantas, que, después de ser extraído de las células, conservaba su actividad capaz de romper la sacarosa en glucosa y fructosa. Poco antes de su muerte, Bernard sugirió que la levadura tendría que contener otro enzima específico responsable de la conversión del azúcar en alcohol y dióxido de carbono que pudiera ser extraído igualmente de las células en forma soluble. Esto provocó una agria discusión entre Pasteur y los discípulos de Bernard que no pudo resolverse hasta 1897 cuando se demostró definitivamente que la fermentación alcohólica se puede producir fuera de la célula viva (Losada *et al.*, 1998).

Así, Liebig mantuvo tenazmente hasta el final de su vida, en 1873, sus teorías sobre la naturaleza química de la fermentación, Bernard murió en 1878 sin poder corroborar plenamente su brillante premonición y Pasteur moriría en 1895 convencido de haber demostrado inequívocamente que las fermentaciones son procesos vitales inseparables de la actividad de las células vivas.

Fue, finalmente, Eduard Buchner (1860-1917), en 1897, quién descubrió de manera casual la fermentación del azúcar por extractos de levadura sin células, comprendiendo inmediatamente que la integridad estructural de la célula no era necesaria para la actividad fermentativa. Buchner rompió definitivamente con la idea de que la célula era la unidad estructural y funcional de la vida y de los procesos biológicos, y abrió así un nuevo horizonte a la enzimología (Losada *et al.*, 1998).

Por otro lado, el físico inglés Joseph Thomson (1856-1940) descubrió el electrón y determinó la razón carga/masa de esta partícula subatómica mediante un experimento que se repetiría años más tarde con el protón y otros iones positivos de diversos elementos, terminando con la idea de que el átomo era la unidad íntegra indivisible de la materia (Losada *et al.*, 1998).

2.1.5. Avance hacia un conocimiento profundo: Investigaciones y descubrimientos del s.XX

A partir de este momento se hace mucho más difícil la narración de la historia con las investigaciones y los descubrimientos ordenados cronológicamente. Con las ideas fundamentales y más generales del proceso de la nutrición vegetal descubiertas, las investigaciones se fueron haciendo más específicas y los diferentes campos ramificándose.

Además, no podemos perder de vista que el contexto de nuestra investigación se encuentra en los conocimientos de la nutrición vegetal como proceso fisiológico y ecológico para niveles de Secundaria y Bachillerato. La mayoría de las investigaciones llevadas a cabo a partir de este momento pueden resultar demasiado concretas y específicas para el estudio de la nutrición vegetal y la fotosíntesis para una enseñanza de Secundaria e incluso, muchas veces, para niveles universitarios no especializados. Aunque es cierto que en los libros de texto de Bachillerato, y por supuesto, en los manuales universitarios aparecen conceptos de una mayor profundidad de la que hemos alcanzado en el recorrido de la historia de la ciencia que hemos presentado, como las cadenas de transporte electrónico, por ejemplo; en este estudio nos interesa centrarnos en aquellas ideas generadoras de errores conceptuales o faltas de comprensión del proceso.

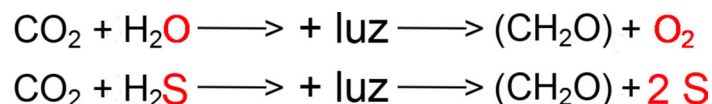
Por este motivo nos hemos centrado en las investigaciones que siguieron reformulando el concepto general de la fotosíntesis hasta llegar a una idea integradora que coloca a la fotosíntesis como un proceso, dentro de la nutrición vegetal, que es clave para la síntesis de materia orgánica en el reciclado de la materia, para la entrada de energía en los ecosistemas y su transferencia a nivel biológico, sin, por ello, olvidar el metabolismo y la fisiología del mismo.

En resumen podríamos decir que la ecuación básica de la fotosíntesis, la que aún aparece en los libros de texto desde los niveles de Secundaria hasta los niveles universitarios, fue formulada por primera vez por de Saussure en 1804 al descubrir el papel del agua en la fotosíntesis vegetal.



Para ello se basó en los datos de algunos bioquímicos vanguardistas de su época: el ginebrino Senebier que había indicado que el “aire fijado” (el CO_2) se incorporaba a la fotosíntesis; el holandés IngenHousz que había descubierto el papel de la luz solar en el proceso; y el inglés Priestley que había comprobado la producción de un gas por parte de las plantas que era capaz de “renovar” el “aire viciado” (el O_2).

Pero, en los años treinta, esta ecuación básica global de la fotosíntesis se estudió de nuevo desde un análisis más profundo y abierto del proceso. Esto llevó a desglosarlo en dos partes perfectamente diferenciables. En 1931, Cornelis van Niel (1897-1985) realizó estudios comparativos entre la fotosíntesis de las plantas verdes y la fotosíntesis de las bacterias sulfúreas, llegando a escribir las ecuaciones globales de ambos procesos (Azcón-Bieto, 2008):



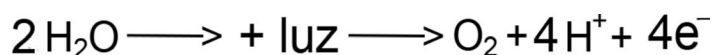
Al analizar estas ecuaciones se llegó a la conclusión de que el azufre producido por las bacterias sulfúreas era análogo al oxígeno que producen las plantas. De esta manera se reescribió la ecuación de la siguiente manera:



donde H_2D es una molécula reducida dadora de hidrógeno (Blankenship, 1992). De esta manera, la fotosíntesis se podía explicar como la reacción en la que el CO_2 era reducido por el hidrógeno procedente del agua, en el caso de la fotosíntesis oxigénica de las plantas, o por los hidrógenos de otra molécula reducida, en el caso de otros tipos de fotosíntesis. En este momento se deduce que la liberación de oxígeno por parte de las plantas es solo una consecuencia derivada del proceso de deshidrogenación del agua. Lo que es esencial en este proceso es que la molécula de agua es escindida por la luz.

Cabe destacar la enorme importancia de esta concepción del proceso. La finalidad de la fotosíntesis no es la producción de oxígeno, sino que la liberación de este gas debe ser entendida como la consecuencia derivada de la ruptura de la molécula de agua para la obtención de los hidrógenos necesarios para la reducción de la molécula que se fija en el proceso, el CO_2 . No olvidemos que la idea de que la finalidad de la fotosíntesis es uno de los preconceptos más difíciles de erradicar puesto que se encuentra presente en todos los niveles educativos alcanzando, a menudo, a los propios profesores de Secundaria (Angosto & Morcillo, 2015).

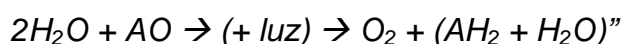
En 1939, Robert Hill (1899-1991) descubrió que los cloroplastos aislados de las hojas son capaces de producir oxígeno al ser iluminados en presencia de un compuesto químico adecuado como aceptor de electrones artificial. Él utilizó ferricianuro y la reacción provocaba que se redujera ferrocianuro. (Azcón-Bieto, 2008). Partiendo de este descubrimiento, Hill formuló la siguiente ecuación:



La ecuación de Hill tuvo una enorme importancia científica porque fraccionaba la fotosíntesis en dos fases al demostrar que la liberación de oxígeno podía realizarse sin reducción de CO_2 . Así, mediante la hidrólisis del agua se obtienen los hidrógenos y los electrones necesarios para continuar con el proceso, mientras que el oxígeno se libera al medio como producto de desecho. También confirmó que todo el oxígeno liberado procedía del agua, y no del CO_2 . De esta manera, la reacción de Hill puso de manifiesto que el hecho primario de la fotosíntesis es la transferencia de electrones y protones de una sustancia a otra en contra de un gradiente de potencial redox químico. Esta transferencia en contra de gradiente es posible gracias a la energía de activación de la luz. Posteriormente, en la segunda fase de la fotosíntesis, la energía y el poder reductor obtenidos gracias al movimiento de estos protones y electrones, se utilizará para reducir diferentes compuestos inorgánicos; con este experimento, Hill demostró que no tiene por qué ser el CO_2 .

A la luz de este experimento se puede reformular la reacción global de la fotosíntesis desde un punto de vista integrador y abierto, en el cual la molécula a reducir no tiene que ser el CO_2 . En la página 168 del libro de fisiología vegetal Azcón-Bieto (2008) se propone una reacción global integradora de toda la fotosíntesis vegetal:

“Finalmente, se puede escribir una reacción global integradora de toda la fotosíntesis vegetal haciendo referencia de modo general a su segunda fase, en la cual se lleva a cabo la asimilación de los distintos elementos a partir de fuentes inorgánicas (CO_2 , NO_3^- , SO_4^{2-}):



La molécula AO contiene el elemento que será aceptor final de electrones y protones, por tanto “A” puede ser carbono, nitrógeno o azufre. “A” será reducido parcialmente en un azúcar en el caso del carbono $(\text{CH}_2\text{O})_n$, o totalmente, como en el caso del nitrógeno que da lugar a NH_4^+ , o del azufre

que da lugar a SH_2 . Como puede comprobarse, el oxígeno procede de las fuentes inorgánicas (CO_2 , NO_3^- , SO_4^{2-}).

Aunque la reacción de Hill fue propuesta en 1939, la idea de que mediante la fotosíntesis se reducen otros compuestos inorgánicos además del CO_2 pareció quedar en un segundo plano y las investigaciones se centraron en descubrir las rutas de fijación del CO_2 . Estas investigaciones parecen llegar a su punto más álgido e importante cuando Melvin Calvin y sus colaboradores presentaron el mecanismo de fijación del CO_2 a un aceptor que posteriormente es regenerado que se conoce con el nombre de ciclo de Calvin.

De esta manera no fue hasta la década de los setenta que empezaron a aparecer nuevos mecanismos de fijación de una versatilidad, en la mayor parte de los casos, superior a la del ciclo de Calvin, ya que entre los productos de fijación no solo se encuentran los hidratos de carbono, sino también aminoácidos y ácidos orgánicos (Vicente, 1976).

Los trabajos pioneros encaminados a dilucidar el mecanismo mediante el cual se fija el CO_2 mediante la fotosíntesis fueron llevados a cabo por Ruben y colaboradores en 1939 quienes, utilizando como marcador radiactivo $^{11}\text{CO}_2$, fueron capaces de afirmar que el producto de fijación tendría naturaleza aldehídica, que en el proceso intervendría el ATP y que sería una carboxilación (Ruben *et al.*, 1939). Sin embargo, la utilización de otro marcador radiactivo fue la clave para elucidación correcta del mecanismo (Vicente, 1976). Benson *et al.* (1949) publicaron un resumen de los hechos que observaron al exponer a condiciones de iluminación en tiempos variables cultivos de *Chlorella* o *Scenedesmus* con el marcador $^{14}\text{CO}_2$ y después realizar cromatografías con los extractos celulares que resultaban al matar las células con alcohol caliente. Con estos experimentos llegaron a las siguientes conclusiones:

- La fijación del radioisótopo se lleva a cabo en condiciones de oscuridad, siempre que antes hubiera habido algún periodo de iluminación.

- Los productos marcados eran preferentemente hidratos de carbono de bajo peso molecular, aunque si los tiempos de incubación con el radioisótopo se alargaban, aparecían disacáridos, aminoácidos e, incluso, nucleótidos.

Disminuyendo los tiempos de incubación encontraron que el compuesto mayoritario marcado era el ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA), así que consideraron que este compuesto era el primer producto que resultaba de la incorporación del ^{14}C del $^{14}\text{CO}_2$ en la materia orgánica (Barceló, 2003).

La identificación del compuesto aceptor del dióxido de carbono que conducía a la síntesis de 3-PGA fue descrita por Calvin en 1955 (Vicente, 1976). Para ello se pensó que ese precursor se acumularía en condiciones de iluminación pero ausencia de CO_2 . Así se tras un periodo de exposición al $^{14}\text{CO}_2$, se pasó el cultivo del alga a condiciones de iluminación pero total ausencia de CO_2 . Lo que se detectó fue una rápida disminución del 3-PGA marcado y el aumento del compuesto ribulosa-1,5-difosfato (RuDP). Éste, evidentemente, se acumulaba porque no se podía transformar en 3-PGA al faltar el CO_2 . El descubrimiento de una enzima que lograba la carboxilación de la ribulosa-1,5-difosfato y que se localizaba en los cloroplastos (Herber *et al.*, 1963), confirmaba la naturaleza de pentosa difosfato como el auténtico sustrato de carboxilación. A esta enzima se le conoce con el nombre de ribulosa-1,5-difosfato carboxilasa oxigenasa o, simplemente, RuBisCO.

De esta manera, ya en la década de los 50 se concluyó que el producto de transformación inmediata de la fijación del CO_2 era una triosa aldosa y que en las reacciones secuenciales que conducen a la síntesis del primer azúcar intervienen los dos principales productos de las vías de transporte electrónico fotosintético, ATP y NADPH₂ que son producidos en el proceso de fotofosforilación no cíclica (Vicente, 1976).

Una vez desentramado el ciclo y todas las moléculas intermedias comenzaron las investigaciones acerca de la regulación metabólica del mismo. El primer nudo de regulación fue descrito por Buchanan *et al.* (1967) a nivel de la fructosa difosfatasa y otro punto de regulación importante lo encontró Anderson *et al.* ese mismo año (1968).

Según se fueron repitiendo los experimentos de Calvin en otras plantas se fue comprobando que el proceso era idéntico para la mayoría de los casos, sin embargo en plantas como la caña de azúcar, la exposición de hojas a dióxido de carbono marcado conduce a la rápida aparición de ácidos dicarboxílicos marcados en su carbono 4, tales como el malato, aspartato u oxalacetato. El 3-PGA aparece marcado en el carbono 3, pero el marcaje aparece posterior a la de los ácidos anteriores (Hatch & Slack, 1966). Continuando con sus experimentos, Hatch y Slack (1967, 1968) aislaron y purificaron a partir de hojas de caña de azúcar una enzima importante para el metabolismo del carbono de este tipo de plantas, la piruvato dikinasa. El hecho importante es que esta enzima no se ha encontrado en vegetales que poseen el ciclo de Calvin funcional, lo que indicaría que se trata de una enzima específica de un proceso de carboxilación fotosintética distinto al que se conocía (Vicente, 1976). Al desentramar la ruta de fijación del carbono que mostraban estas plantas se llegó a la conclusión de que una vez que se obtiene el 3-PGA a partir del oxalacetato, las transformaciones de azúcares que conducen a la formación de sacarosa se llevan a cabo de igual manera para las plantas con el ciclo de Calvin funcional y para las plantas del tipo de la caña de azúcar. A este tipo de plantas se les llama C-4 ya que el primer producto de fijación del CO₂ es un compuesto formado de cuatro carbonos, a diferencia de las plantas que realizan el ciclo de Calvin que son conocidas como plantas del tipo C-3 ya que el 3-PGA tiene es una molécula de 3 átomos de carbono.

El estudio de la ruta de metabolismo fotosintético del tipo C-4 y del tipo de plantas que lo poseen ha llevado a descubrir que existen dos clases de células distintas que muestran cloroplastos de diferente morfología y fisiología

(Vicente, 1976). En investigaciones posteriores en las plantas de tallos suculentos han llevado a descubrir un nuevo tipo de plantas según la ruta de fijación fotosintética del carbono que muestran; las denominadas plantas CAM.

Aunque todas estas investigaciones son de un enorme interés para la comprensión del proceso fotosintético, para este estudio en particular no son muy relevantes, ya que no lo son para la adquisición de una visión general del proceso. Lo que resulta interesante para este estudio es comprender por qué no ha llegado hasta nuestros días, de manera generalizada, la idea de la fotosíntesis como proceso de síntesis de todos los componentes orgánicos que las plantas necesitan. Por lo tanto, vamos a continuar el recorrido histórico en este sentido.

Ya los experimentos de los años 50 de Calvin y sus colaboradores mostraban que en las exposiciones al dióxido de carbono marcado en iluminación se generaban otros compuestos a parte de los glúcidos. Encontraron que en exposiciones de entre 15 y 60 segundos se formaban cantidades significativas de aminoácidos como ácido aspártico, alanina, serina, glicina y ácido málico, además de otros compuestos con fósforo que no identificaron (Bassham, 1950). A este respecto Abelson y Hoering (1961) realizaron un estudio en muchas especies de vegetales y encontraron marcaje en los aminoácidos. Sin embargo no pudieron concluir que su biosíntesis requiera luz. La estricta dependencia de fotosíntesis fue puesta de manifiesto por Buchanan en 1969 cuando demostró que extractos de *Chromatium* podían sintetizar α -cetobutirato utilizando el potencial de la ferredoxina reducida (Vicente, 1976). Hay que tener en cuenta que la ferredoxina es una proteína que interviene en el transporte fotosintético de electrones y que hoy en día sabemos que puede ceder los electrones de la cadena de transporte electrónico a diferentes enzimas, entre ellas a la ferredoxina-nitrito oxidoreductasa, o nitrito reductasa (implicada en el metabolismo del nitrógeno), la glutamina α -cetoglutarato aminotransferasa, o glutamato sintasa (implicada también en el metabolismo del nitrógeno) y la ferredoxina-tiorredoxina oxidoreductasa, o tiorredoxina reductasa (implicada

en el metabolismo del azufre) (Azcon-Bieto, 2008); de manera que hoy sabemos que el metabolismo de reducción y fijación del carbono, del nitrógeno y del azufre están ligados a la transferencia de electrones por parte de la ferredoxina durante la transferencia de electrones en el cloroplasto.

La **imagen 2.1.** muestra como la reducción de los nitratos a nitritos y posteriormente de los nitritos a ión amonio son procesos acoplados a la fotosíntesis a través de la ferredoxina reducida de la cadena fotosintética de transporte electrónico y porque son necesarios productos de la primera fase de la fotosíntesis (ATP y poder reductor). Aunque la imagen no muestra la reducción de sulfatos, este proceso también está relacionado a la transferencia de electrones desde la ferredoxina reducida, al ATP y al poder reductor obtenidos en la primera fase de la fotosíntesis.

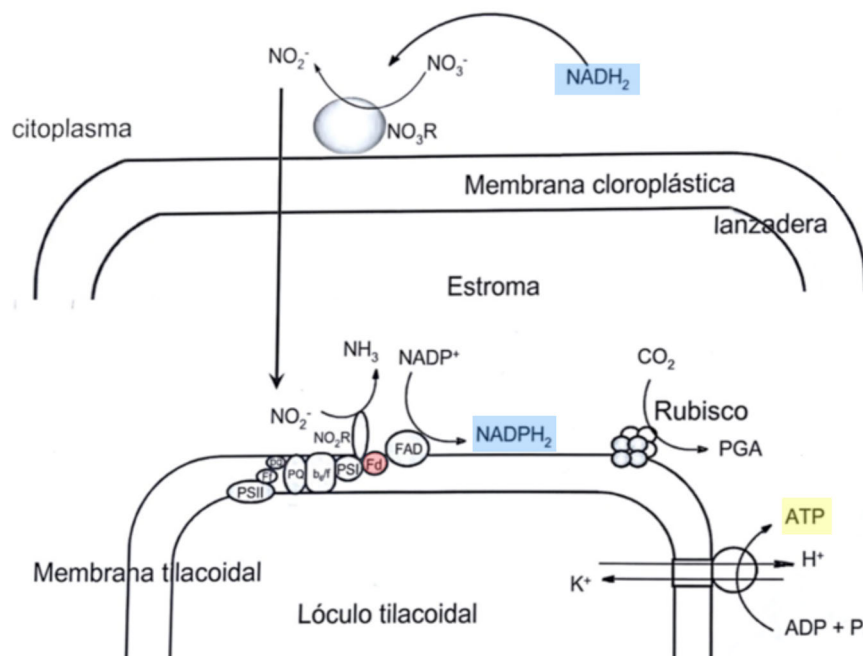


Imagen 2.1. Asimilación fotosintética de nitrato y su relación con la formación de ATP y poder reductor durante la primera fase de la fotosíntesis.

2.2. PROBLEMAS Y DIFICULTADES PARA LA ENSEÑANZA Y EL APRENDIZAJE DE LA NUTRICIÓN VEGETAL EN GENERAL Y DEL PROCESO DE FOTOSÍNTESIS EN PARTICULAR

Uno de los factores más importantes que afecta al aprendizaje significativo y permanente de los estudiantes son los preconceptos. Las ideas alternativas o erróneas (*misconceptions* en Inglés) pueden definirse como aquellas que los estudiantes desarrollan y que distan en mayor o menor medida del significado científico aceptado (Köse, 2008). Sin embargo, uno de los asuntos aún sin resolver después de décadas de investigación sobre el tema es la variedad en la terminología usada para referirse a estas ideas cuyo número de denominaciones para referirse a lo mismo ha llegado casi a treinta términos diferentes (Furió, 1996; Wandersee *et al.*, 1994; Posada, 2000). Algunos investigadores defienden que esta enorme diversidad terminológica refleja dos tendencias opuestas (Wandersee *et al.*, 1994). Los términos como errores, preconcepciones, concepciones ingenuas, ideas erróneas, ideas preinstruccionales, dificultades conceptuales, creencias supersticiosas, conceptos precientíficos y teorías ingenuas implican que el conocimiento del alumno es considerado como una desviación del conocimiento científico por el investigador, actuando como barreras potenciales para el aprendizaje. Por otro lado, aquellos investigadores que entienden que los conceptos científicos nuevos se integran con las ideas preexistentes del estudiante utilizan términos como: ideas de los alumnos, concepciones alternativas, teorías de sentido común, constructos personales, esquemas alternativos, ciencia de los niños, ideas previas. No obstante, algunos investigadores advierten sobre la tentación de juzgar a un investigador por los términos que utiliza en sus publicaciones (Gunstone, 1989; Wandersee *et al.*, 1994) y como no es objetivo de este estudio calificar estas concepciones, en este trabajo utilizaremos diferentes términos tratando de evitar cualquier connotación al respecto. Así, no será objeto de estudio la posición en la que se encuentran los estudiantes que poseen estas ideas para aprender nuevas concepciones, sino que se analizará la persistencia de alguna de ellas a lo largo de los niveles educativos

considerando que uno de los objetivos de la educación es sustituir estas ideas por otras más aceptadas y preguntándonos las posibles causas de esta resistencia al cambio.

2.2.1. El origen de las ideas alternativas

Una de las preocupaciones que ha ocupado la atención de los investigadores de las concepciones alternativas de los estudiantes es el origen de éstas (Wandersee *et al.*, 1994). Es a partir de la información que han estado recibiendo a través de diversas fuentes que los estudiantes construyen sus propias concepciones, más o menos acertadas (Caballero, 2008). La propuesta de Pozo y Gómez, (2001) diferencia tres fuentes fundamentales de donde surge el conocimiento y, en consecuencia, estas ideas alternativas: la experiencia sensorial, la cultura y la escuela.

o Origen sensorial

A través de los sentidos el niño absorbe la realidad del mundo que está a su alrededor haciendo interpretaciones de sí mismo y del entorno inmediato utilizando el gusto, el olfato, el equilibrio, el tacto, la vista, etc, a la vez que estos mismos se desarrollan. Esas percepciones sensoriales van quedando grabadas en su memoria e, incluso, conformando su cerebro, permitiendo que el mundo resulte entendible, e incluso, previsible (Pozo & Gómez, 2001). De las percepciones sensoriales suele surgir una *visión realista ingenua* donde se considera como “hecho real” la imagen o la representación directa que detectan estos sentidos (Furió *et al.*, 2000). En nuestro estudio veremos que ideas como que las plantas comen tierra, que las plantas solo necesitan agua para vivir o que el abono aporta la materia orgánica que las plantas necesitan para crecer tendrían este origen.

- Origen cultural

La representación mental que va construyendo el individuo de su medio no ocurre exclusivamente a partir del contacto físico y sensorial con el mundo que le rodea ya que, además de interactuar con el mundo, el individuo participa de una organización cultural. A través del lenguaje y la interacción con el entorno social el niño recibe ideas, creencias y mitos que le ayudan a explicar el mundo cotidiano. Esas concepciones, influenciadas por la “sabiduría popular”, facilitarán la actuación de la persona en el ámbito social (Pozo & Gómez, 2001) y ofrecerán un marco interpretativo sobre la realidad más inmediata. Los modelos explicativos que aparezcan de manera recurrente en la cultura serán aceptados por el individuo, especialmente aquellos que tienen “sentido común” y resultan “lógicos” según esos esquemas mentales que se ha ido construyendo. Y, lo que es más importante, los aceptará sin cuestionar su veracidad. El sentido común de esas “verdades” se caracteriza por conclusiones o generalizaciones extraídas con rapidez y a partir de unas pocas observaciones cualitativas poco rigurosas (Furió *et al.*, 2000). Por ejemplo, la idea de que es peligroso dormir con plantas en la habitación por la noche porque podemos quedarnos sin oxígeno podría tener este origen.

- Origen escolar

La escuela, por supuesto, también ocupa un papel muy relevante en la construcción de las ideas que el alumno tiene del mundo. Argumenta Pozo (1996) que el razonamiento basado en analogías, muy habitual en el ser humano, lleva a buscar parecidos entre el conocimiento científico, el transmitido en la escuela, y el conocimiento corriente de las cosas. Al no valorar los modelos científicos como un saber diferente, más validado que otras formas de saber, los alumnos tienden a mezclar y a confundir el discurso científico con su discurso cotidiano.

A parte de estos tres orígenes, existe también una evidencia clara de que los libros de texto proporcionan otra vía para introducir concepciones alternativas en los estudiantes (Wandersee *et al.*, 1994). Se ha señalado que la secuencia del contenido, el uso de la terminología, los dibujos o imágenes en el texto, la intención de los autores, entre otros, se convierten en fuentes potenciales para inducir concepciones alejadas del conocimiento científico. El estudiante, al leer un texto, individualiza y da sentido al contenido del libro según los patrones y los esquemas de realidad que ha forjado anteriormente. Además de todo esto, y por desgracia, algunos estudios han evidenciado que los maestros también pueden ser fuente de concepciones equivocadas. El problema reside aparentemente en errores conceptuales que el maestro sostiene como verdades (Wandersee *et al.*, 1994) y que afectan a la adquisición del conocimiento científico actual. Si el alumno ve al profesor como fuente de conocimiento, recibe y acepta la concepción que el profesor le transmite sin cuestionarlo.

Puesto que estas concepciones alternativas o estos errores conceptuales se forjan por una mezcla de deducción lógica, aprendizaje y saber popular, son muchas veces complicados de sustituir por el concepto más acertado. Más comúnmente, lo que se consigue en la aula es que los alumnos y las alumnas formen nuevas ideas alternativas mezclando sus ideas previas con algo de lo que se trabaja en clase, adecuándolo para que no rompa su esquema mental, y sin poder relacionarlo. Es por esto que es necesario determinar los preconceptos que los alumnos tienen acerca de un tema, no sólo en clase al iniciar cualquier Unidad Didáctica, lo que puede servir como punto de referencia para planear las actividades y desarrollar estrategias de aprendizaje y de evaluación (Akker, 1998; Fensham, 2000), sino en todo el proceso de enseñanza-aprendizaje. Pero aunque esta acción es sin duda importante y necesaria, realmente no es algo que pueda realizar cada profesor o profesora aisladamente. Es una tarea compleja que exige investigación didáctica, reflexión, experimentación en el aula y puesta en común de los resultados observados.

De esta manera, ya desde hace bastantes años, la investigación sobre las ideas alternativas ha tomado un papel importante dentro de la investigación didáctica, cuya principal finalidad sería la de proporcionar una fuente de información confiable y de fácil acceso que contribuya a que los profesores cuenten con un conjunto amplio de preconceptos o ideas previas alternativas que les ayuden en su labor docente y que sin duda deberían afectar a los contenidos de los currículos, así como a su secuenciación a lo largo de todo el periodo educativo. Además estudios recientes muestran las buenas implicaciones que pueden tener para los profesores el conocimiento de estas ideas previas en sus alumnos (Schoon & Boone, 1998; Jones *et al.*, 1999).

En la actualidad, gran cantidad de investigaciones, elaboración de textos, desarrollos curriculares y algunos materiales educativos se llevan a cabo teniendo en cuenta las ideas previas de los estudiantes de los niveles escolares a los que está destinado dicho trabajo. En el campo de la investigación didáctica, las ideas previas han ofrecido nuevos enfoques en torno al aprendizaje como el cambio conceptual (Strike & Posner, 1985; Chi, 1992) y han despertado el interés por analizar las correspondencias entre la historia de la ciencia y la evolución de las concepciones de los estudiantes (Brush, 1989; Matthews, 1990; Gallegos, 1998, Angosto & Morcillo, 2014). También han constituido un factor clave para la construcción de modelos representacionales, tanto de corte cognoscitivo como de corte epistemológico (Carey, 1985; Tiberghien, 1994; Flores & Gallegos, 1998; Flores, 1999), así como para el estudio de diferencias transculturales (Duit, 1984; Richards, 1989) y de género (Watts & Bentley, 1994; Whitelegg, 1996) y, en función de su interpretación, de diversos enfoques en torno a las metodologías para abordar el problema de la enseñanza de la ciencia (Erickson, 2000). De aquí la gran importancia de estudiar estas ideas a partir de las distintas realidades socioculturales de los estudiantes, prestando una especial atención a la hora de formular los currículos, en la región donde se pretenden aplicar para, así, acercar la enseñanza lo máximo posible a los que la reciben.

2.2.2. El caso particular de las ciencias

La didáctica de las ciencias experimentales, hoy por hoy, constituye un dominio específico de investigación y conocimiento (Gil *et al.*, 2000; Porlán, 1998). Desde hace ya varias décadas, numerosos equipos docentes comenzaron a introducir e intercambiar diferentes propuestas innovadoras, buscando mejorar el proceso de enseñanza y, como resultado, hubo un aumento en los trabajos publicados centrados en los problemas de la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias. Tanto el número de publicaciones como el número de educadores científicos que participaron en esas investigaciones dan testimonio de la importancia que alcanzó esta línea de trabajo. Las concepciones de los alumnos se convirtieron en objeto de estudio y comenzaron a aparecer una gran cantidad de estudios relacionados con las ideas de los alumnos sobre conceptos y teorías científicas (Gil *et al.*, 2001; Porlán, 1998). El descubrimiento de la existencia de las ideas previas ha sido un suceso importante en el desarrollo de la enseñanza de la ciencia, por varias razones. En primer lugar, porque han proporcionado conocimientos acerca de las concepciones con las que los estudiantes se enfrentan al aprendizaje de los conocimientos científicos en la escuela; en segundo, porque han puesto de manifiesto que este aprendizaje lleva implícito un problema de construcción y transformación conceptual y, en tercer lugar, porque han colocado al sujeto que aprende en el eje del proceso de enseñanza-aprendizaje, es decir, que buena parte de la investigación y del desarrollo educativo actual toman al estudiante como elemento central. Tanto aumentó el interés por las ideas de los alumnos que, en 1994, Pfunf y Duit inventariaron más de 3.000 trabajos publicados en revistas anglosajonas dedicadas solamente al estudio del tema (Posada, 2000). Quizá el impacto más importante que han tenido estas investigaciones sobre las ideas alternativas es que el profesor ahora tiende a tener muy en cuenta el conocimiento anterior del alumnado sobre el cual ha de integrarse la nueva información.

Sin embargo, no está todo dicho ni solucionado ya que, para los estudiantes, las asignaturas científicas resultan a menudo complicadas e incomprensibles, siendo esta una de las razones por las que se ha observado una disminución de estudiantes que escogen asignaturas de ciencias a partir de 4º de la ESO. Sin embargo teniendo en cuenta el mundo en el que vivimos, basado en gran medida en avances científicos y tecnológicos, resulta, podríamos decir, completamente fundamental la formación en estas materias (Caballero, 2008).

En el caso del aprendizaje de la biología, los estudios acerca de la comprensión de los estudiantes muestran numerosos tópicos que resultan complejos para los estudiantes y que reúnen una enorme cantidad de errores conceptuales. Dentro de estos podríamos destacar los procesos de transporte como la difusión y la ósmosis, el sistema circulatorio, la genética, la fotosíntesis y la respiración (Selvi & Yakişan, 2004; Keleş & Kefeli, 2010). Uno de los motivos que hacen de las ciencias, de entre ellas la biología, algo complicado para los alumnos es que la mayoría de los conceptos fundamentales en las ciencias no son objetos, eventos o seres tangibles, sino conceptos abstractos que se antojan difíciles de construir como ideas en sus cabezas (Aydoğan *et al.*; Keleş & Kefeli, 2010; Artun & Bayram, 2011).

Prevenir la aparición de estas ideas alternativas debe ser una de las batallas que no debemos perder ya que no hay que olvidar que una vez que aparecen, se hacen muy resistentes al cambio y no son fáciles de eliminar (Köse, 2008) y estudios previos demuestran que si estos conceptos erróneos no son corregidos en los niveles de la educación básica, perduran en los niveles universitarios de igual manera (Cañal, 1999).

2.2.3. El problema particular de la nutrición de las plantas

Centrándonos ahora en nuestro caso particular, resulta sencillo comprender por qué el tema de la nutrición de las plantas y más específicamente el tema de la fotosíntesis de las plantas, resulta ser uno de los más conflictivos en el aula en su asimilación y comprensión (Haslam & Treagust, 1987; Cañal, 2005). Por esto no es de extrañar que los trabajos centrados en el análisis de las concepciones de los estudiantes sobre los procesos de fotosíntesis y respiración, y la génesis de las mismas, hayan despertado un gran interés entre los investigadores desde comienzos de los años ochenta (Charrier *et al.*, 2006). El objetivo de estas investigaciones se suele enfocar en solventar la aparición de concepciones alternativas generalizadas (Charrier *et al.*, 2006). Los procesos de fotosíntesis y respiración se consideran tópicos científicos muy importantes y están reflejados en los currículos de muchos países (Köse, 2008). Parece una realidad que las ideas alternativas sobre estos tópicos aparecen de una manera generalizada en todas las culturas que trabajan sobre este proceso en la enseñanza (Köse, 2008). Además parece ser que algunas de estas ideas alternativas aparecen en los niveles de Educación Primaria y se mantienen hasta niveles universitarios, estando presentes incluso en los mismos profesores, lo cual es un problema muy grave (Cañal, 1990) puesto que se puede considerar que una de las razones de la aparición de estos preconceptos en los estudiantes son precisamente los errores de los propios profesores (Sanders, 1993; Köse, 2008). Por este motivo podemos encontrar trabajos de investigación acerca de este tema en todos los niveles de enseñanza (Charrier *et al.*, 2006) cuyos principales objetivos son la detección de esas ideas alternativas, sus razones y sus posibles soluciones.

Quizá sería conveniente destacar que en la mayoría de estudios sobre el tema, la tónica general es encontrar las ideas alternativas referentes a la fotosíntesis muy remarcadas, quedando en un segundo plano los errores conceptuales referentes a la respiración de las plantas. Incluso muchos de los errores conceptuales que se pueden clasificar dentro del proceso de respiración parecen en cierto sentido derivados de las ideas erróneas que tienen acerca de

la fotosíntesis. Así se podría llegar a intuir que un proceso puede resultar más sencillo de comprender y de retener por los estudiantes que el otro. La pregunta sería por qué. También se observa que quedan en un segundo plano con respecto a los errores conceptuales relacionados con la fotosíntesis, aquellos sobre la nutrición vegetal o conceptos tan básicos como la nutrición autótrofa. Sin embargo, la presencia de este tipo de errores demuestra que las raíces del problema son bastante profundas.

Es en Educación Secundaria donde se aborda con cierta extensión y detenimiento la temática de la nutrición vegetal propiamente, sin embargo no podemos obviar que es en Primaria donde se construyen muchos de los primeros conceptos y relaciones conceptuales elementales (Cañal, 2005). De igual manera, y aunque la Educación Primaria pueda ser el inicio de estas concepciones, es importante resaltar el hecho de que muchas de estas se detectan en todos los cursos académicos sobrepasando el instituto y alcanzando niveles universitarios e incluso afectando a los propios profesores que ejercen el ejercicio docente en las aulas (Cañal, 2005; Köse, 2008).

En muchas investigaciones al respecto podemos encontrar numerosas concepciones alternativas acerca del proceso de la fotosíntesis, de la respiración y de la nutrición vegetal, en general. Solo centrándonos en aquellas que consideran a la fotosíntesis como un proceso de intercambio gaseoso directa o indirectamente podemos encontrar:

- La fotosíntesis introduce CO_2 y expulsa O_2 por el día mientras que por la noche funciona al revés (Maskill & Cachapuz, 1989; Prokop & Fancovicová, 2006; Köse, 2008).
- No se puede dormir con plantas en la habitación porque por la noche consumen el O_2 (Cañal, 1990; Charrier y Obenat, 2001; Köse, 2008).
- La fotosíntesis es la respiración de las plantas (Maskill & Cachapuz, 1989; Thomas & Silk, 1990; Hazel & Prosser, 1994; Abdullah & Scaife,

1997; Prokop & Fancovicová, 2006; Çepni & Keleş, 2006; Marmaroti & Galanopoulou, 2006; Yenilmez & Tekkaya, 2006 Köse, 2008).

- La fotosíntesis tiene como finalidad producir O₂ (Abdullah & Scaife, 1997; Prokop & Fancovicová, 2006; Köse, 2008).
- Las plantas fotosintetizan por el día y respiran por la noche (Cañal, 1990; Eisen & Stavy, 1993; Charrier & Obenat, 2001; Köse, 2008).
- La fotosíntesis es una 'respiración inversa' (Cañal, 1999).

Con respecto a la respiración encontramos ejemplos como:

- La respiración ocurre en plantas solo por la noche o en ausencia de energía lumínica (Wandersee, 1983; Haslam & Treagust, 1987; Tamir, 1989; Hill, 1997; Çapa, 2000; Sensoy, 2002; Tekkaya & Balci, 2003; Köse, 2004; Çepni & Keleş, 2006; Marmaroti & Galanopoulou, 2006; Yenilmez & Tekkaya, 2006; Keleş & Kefeli, 2010).
- La fotosíntesis y la respiración son procesos contrarios (Cañal, 2005; Agosto, 2013).
- Las plantas solo respiran cuando no pueden hacer la fotosíntesis (Keleş & Kefeli, 2010).
- Las plantas no respiran (Songer & Mintzes, 1994; Hill, 1997; Çapa, 2000; Griffard, 2001; Özay, 2001; Tekkaya & Balci, 2003; Köse, 2004; Keleş & Kefeli, 2010).
- Los humanos expulsan CO₂ en la respiración mientras que las plantas expulsan O₂ (Anderson *et al.*, 1990).
- La respiración en las plantas solo tiene lugar en las hojas (Wandersee, 1983; Haslam & Treagust, 1987; Hill, 1997; Çapa, 2000; Tekkaya & Balci, 2003; Çepni *et al.*, 2006; Köse, 2008).

- La respiración no está relacionada con la nutrición (Bishop *et al.*, 1986; Keleş & Kefeli, 2010).
- Las plantas no pueden usar el oxígeno (Griffard, 2001; Çepni & Keleş, 2006; Marmaroti & Galanopoulou, 2006; Yenilmez & Tekkaya, 2006).

Aparte también encontramos que, en general, se confunde la fotosíntesis y la respiración, en todos los sentidos (Cañal, 2005; Köse, 2008). Además, se confunden constantemente los productos o los sustratos de ambos procesos asignándole a cada uno los del otro y viceversa. También aparece la idea de que la finalidad de la fotosíntesis es la obtención de energía que es en realidad el objetivo de la respiración (Astudillo y Gené, 1984; Rumelhard, 1985; Stavy, Eisen & Yaakobi, 1987; Cañal, 1990; Eisen & Stavy, 1993; Charrier & Obenat, 2001; Köse, 2008).

También podemos encontrar otros preconceptos que aunque puedan relacionarse con la fotosíntesis, en realidad, son de una índole más general sobre la nutrición vegetal como que el Sol es comida para las plantas, que la comida de las plantas es el agua y los minerales del suelo, que durante la fotosíntesis, la luz del Sol se convierte en comida para las plantas, o que con la fotosíntesis, el dióxido de carbono es convertido en oxígeno (Cañal, 1990; Çepni & Keleş, 2006; Marmaroti & Galanopoulou, 2006) y, en general, se desconoce por completo el papel del CO₂ y del O₂ (Astudillo y Gené, 1984; Charrier y Obenat, 2001).

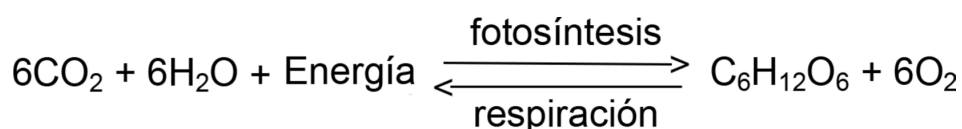
La enorme similitud entre los estudios previos y los nuestros propios indican que, al menos sobre este tema en particular, los alumnos de diferentes sistemas educativos, viviendo en diferentes países y teniendo edades distintas presentan las mismas ideas alternativas y errores conceptuales. Esto también lo remarcan otros autores como Köse (2008) y Keleş & Kefeli (2010).

La producción de estas concepciones alternativas parece estar relacionada con una malla compleja de factores (Battinger *et al.*, 1988; Cañal, 1990) como una formación científica deficiente de los docentes en relación a este proceso, insatisfactorias condiciones de trabajo en las que hay poco tiempo para la formación permanente de los docentes, inadecuada e insuficiente preparación didáctica, materiales curriculares con planteamientos tradicionales, contenidos no actualizados o con errores en los libros de texto, un esquema rígido de la organización escolar y las influencias negativas del contexto sociocultural cotidiano (Cañal 1990). Ciertamente es que desde que Cañal describió estos factores se ha trabajado mucho por mejorar algunos de ellos, pero lo que es innegable es que aún queda mucho por hacer ya que en recientes estudios se sigue comprobando que estas ideas alternativas permanecen presentes (Köse, 2008; Keleş & Kefeli, 2010; Angosto & Morcillo, 2015).

En algunas investigaciones acerca de este tema se muestran otros factores más específicos sobre la génesis de estas concepciones. Por ejemplo, uno bastante llamativo podría ser el exceso de información proporcionada por los docentes que resulta innecesaria para la comprensión del proceso (Cañal, 1990; Eisen & Stavy, 1993); esto se suma a que esos mismos estudiantes tienen verdaderas carencias en la formación básica necesaria para comprenderlo (Cañal, 2005; Köse, 2008). Por ejemplo tienen grandes problemas para entender el cuerpo vivo como un sistema químico (Campestrini, 1992; Eisen & Stavy, 1993), encuentran dificultades para comprender los gases como sustancias, no relacionan la nutrición con la obtención de energía, tienen problemas para comprender ciertos procesos a nivel celular, etc. (Cañal, 2005). Esto está relacionado con una temporalización de los conceptos que se trabajan a lo largo de los currículos en los diferentes cursos bastante deficiente; que introduce conceptos como los procesos metabólicos bioquímicos antes de que los alumnos comprendan bien los niveles de organización de la materia; y en estos niveles se les explica y evalúa antes ni siquiera de introducirles en el mundo de la química. Esto provoca que

los alumnos acomoden estos conocimientos como pueden en su cabeza, sin comprenderlos realmente.

También podemos encontrar algunas de las causas de estas concepciones en los libros de texto que, en la práctica habitual, resumen en una misma ecuación la fotosíntesis y la respiración separadas por una flecha de dos direcciones, dando así a entender que ambos procesos son opuestos (Barras, 1984; Cañal, 1999; Angosto, 2013) e induciendo la idea de que ambos procesos no se pueden dar a la vez.



Los libros de texto también pueden ser responsables de la desestructuración de los contenidos al separarlos en ‘cajones estanco’ con una ausencia muy llamativa de relación entre los temas, cuando, precisamente el tema de la fotosíntesis, la respiración y la nutrición vegetal en general, se explican en cualquier unidad que trabaje tópicos tan separados como los tipos de células, los tipos de nutrición, la nutrición vs alimentación, los nutrientes, el reciclado de la materia, las cadenas tróficas, los flujos de energía en el planeta, los ecosistemas, la conservación del medio ambiente, la contaminación, los recursos energéticos y las energías renovables, el metabolismo, las enzimas, la ingeniería genética, la biotecnología, la evolución, la biodiversidad o los cinco reinos.

Otra idea muy repetida es la visión antropomórfica de los procesos biológicos. Con mucha frecuencia se utiliza el modelo animal para las explicaciones fisiológicas, como la respiración o la nutrición, por tanto los alumnos tienden a solapar el modelo animal sobre el vegetal para darle sentido a lo que saben. Por ejemplo llegan a la conclusión de que las raíces son la boca de las plantas, por lo que entienden que las plantas comen tierra (Cañal, 1990; Cañal, 2005; Köse, 2008).

Además, como ya se ha dicho anteriormente, los procesos de respiración y fotosíntesis son dos ejemplos clarísimos de conceptos que requieren de una abstracción bastante importante que los alumnos encuentran muy difícil hacer (Aydoğan *et al.*; Keleş & Kefeli, 2010; Artun & Bayram, 2011).

Aunque el estudio de las ideas alternativas sobre la nutrición vegetal y su génesis son muy numerosos, sobre todo en los niveles de Educación Primaria y Secundaria, pocos son los autores que se atreven a proponer soluciones. Muy probablemente, esto tiene que ver con que se hace difícil comprobar que dichas propuestas realmente tengan un efecto significativo ya sea en la corrección de estos preconceptos o evitando su aparición. Cañal, en su libro *La nutrición de las plantas; enseñanza y aprendizaje*, (2005), propone una metodología de enseñanza de la nutrición vegetal que remarca la importancia de una temporalización lógica de los contenidos durante los años de Educación Primaria y Secundaria para evitar la aparición y el mantenimiento de estas ideas alternativas. También hay otros estudios que plantean métodos para eliminar aquellos preconceptos presentes en los alumnos como Keleş & Kefeli (2010) que determinan el efecto de material CAI (computer assisted instruction) para suprimir los preconceptos sobre la fotosíntesis y la respiración. Este material trata de animaciones desarrolladas para la comprensión de estos procesos con las que trabajan los estudiantes sustituyendo a las típicas ilustraciones estáticas con las que suelen estudiarlos. Estos materiales CAI se han considerado efectivos eliminando los preconceptos, como sugieren algunos estudios previos como Köse *et al.* (2003).

Sin embargo, la realidad es que nos encontramos muy lejos de solucionar la aparición estos conceptos y de generar un aprendizaje verdaderamente significativo con respecto a estos temas. Por eso, y como ya se ha dicho anteriormente, este estudio se ha centrado en lo que se considera que son los dos pilares fundamentales en la transmisión de la información “fiable” para el aprendizaje de las ciencias: los libros de texto, más concretamente los

manuales universitarios, y los futuros profesores de Secundaria; en la creencia de que si ellos no transmiten bien estos conceptos y, peor aún, poseen ellos mismos errores conceptuales, muy difícilmente vamos a poder solucionar este problema.

2.3. RELACIÓN ENTRE LA HISTORIA DE LA CIENCIA Y LA ENSEÑANZA DE LA NUTRICIÓN VEGETAL

Como ya hemos dicho, el tema de la nutrición vegetal parece tener una marcada relación en lo referente al desarrollo histórico de la ciencia y a la evolución del aprendizaje de los estudiantes. Sin embargo, este paralelismo no se presenta de forma clara cuando los conceptos sobre la fotosíntesis se vuelven más específicos. Esto podría parecernos normal; la ciencia avanza y profundiza mientras que los alumnos siguen teniendo la misma edad y no se les puede introducir temarios muy específicos en niveles de enseñanza Secundaria. Sin embargo no es esto lo que ocurre, ya que en los niveles de Bachillerato podemos encontrar niveles de especificación y profundización bastante marcados. En un primer momento, tanto en los primeros años de enseñanza de la fotosíntesis como al principio de la historia de la ciencia que se ha expuesto anteriormente, la concepción de las plantas, de su vida y su nutrición es muy parecida. Los alumnos muestran una serie de errores conceptuales que podríamos tildar de ingenuos o simples, sobretodo al intentar comprender a las plantas a partir del modelo humano (o animal). Sin embargo, según avanzamos en la historia, los científicos han ido transformando su concepción de todos estos procesos, dándoles una visión y un role más integrador mientras que en los alumnos se observa un “enquistamiento” de algunas ideas erróneas que permanecen aunque ellos profundicen en los conocimientos y estos se compliquen. Además, se observa una ausencia absoluta de la idea, ya aceptada en los años 50, de que mediante el proceso de fotosíntesis la planta fabrica todos los nutrientes orgánicos que necesita.

2.3.1. Primeros años

Es sencillo comprender que los inicios de ambos desarrollos (el histórico y el asociado al aprendizaje) son similares, ya que antes de comenzar a estudiar estos procesos, tanto un estudiante del siglo XXI como un investigador del siglo XVII, se basan en su propia observación y experiencia. Ejemplos de errores conceptuales encontrados al comienzo de las etapas educativas (antes de haber estudiado el proceso de la fotosíntesis, por ejemplo) sería que las plantas solo se alimentan de agua, al observar que las plantas crecen solo con regarlas, que se alimentan de los nutrientes orgánicos ya que es necesario abonarlas o la idea de que las plantas no respiran, ya que la respiración se asocia a los movimientos respiratorios de los cuales las plantas carecen (Cañal, 2005). También es muy típica la visión antropomórfica de los procesos biológicos, en la que se tiende a solapar el modelo animal al vegetal llegando a conclusiones como que el suelo es el estómago de las plantas, que las raíces son la boca o que las plantas comen tierra (Cañal, 1990; Cañal, 2005; Köse, 2008; Angosto & Morcillo, 2015). Por último existen ideas populares persistentes que pasan de padres a hijos y que a pesar de la formación científica no desaparecen. Un ejemplo sería la idea de que es peligroso dormir con plantas porque consumen el oxígeno por la noche (Cañal, 1990; Charrier & Obenat, 2001; Köse, 2008; Angosto & Morcillo, 2015).

2.3.2. Primeros estudios científicos y los cursos de Secundaria

Aunque existan estas ideas con las que nuestros estudiantes llegan a las aulas en Educación Primaria y Secundaria, es competencia de la educación corregirlas y dirigirlas hacia una concepción científica más acertada y moderna. Sin embargo, lo que se observa es que durante el proceso de aprendizaje aparecen nuevos errores conceptuales recurrentes y persistentes, semejantes a las concepciones históricas que aparecieron con las primeras investigaciones. Estas ideas parecen estar relacionadas precisamente con la desestructuración de la enseñanza de la fotosíntesis (Angosto, 2013). Como

ejemplos podemos mencionar el error recurrente de que la fotosíntesis es la respiración de las plantas (Maskill & Cachapuz, 1989; Thomas & Silk, 1990; Hazel & Prosser, 1994; Prokop & Fancovicová, 2006; Köse, 2008), que la fotosíntesis introduce CO₂ y expulsa O₂ por el día mientras que por la noche funciona al revés (Maskill & Cachapuz, 1989; Prokop & Fancovicová, 2006; Köse, 2008), que la fotosíntesis sirve para producir O₂ (Prokop & Fancovicová, 2006; Köse, 2008) o que las plantas fotosintetizan por el día y respiran por la noche (Cañal, 1990; Eisen & Stavy, 1993; Charrier & Obenat, 2001; Köse, 2008), entre muchas otras.

2.3.3. Profundización científica

No podemos obviar que muchas de estas ideas sobrepasan la barrera de la formación universitaria y están presentes en los mismos profesores que ejercen el ejercicio docente en las aulas (Cañal, 2005; Köse, 2008; Angosto & Morcillo, 2015). El problema con la nutrición vegetal en las aulas parece estar relacionado con una malla compleja de factores (Battinger *et al.*, 1988; Cañal, 1990; Angosto & Morcillo, 2015) pero lo más desalentador parece ser lo lejos que estamos de solucionarlo cuando las raíces de estos errores son tan profundas que alcanzan a los propios libros especializados en fisiología vegetal (Angosto, 2013), que son los recursos que se consideran más fiables para la búsqueda de información. Es en esta fase cuando se observa un claro distanciamiento entre la evolución histórica del conocimiento y la que ocurre en las ideas de los estudiantes.

3. Metodología de estudio

El propósito fundamental de este capítulo es describir los procedimientos y el método que hemos utilizado para el desarrollo de esta investigación. La estructura diseñada para esto ha sido la siguiente: primero se da una breve introducción a modo de visión general, después se plantea el problema de investigación y los objetivos y por último se incluye el diseño del estudio con la descripción de las muestras y del instrumento utilizado.

Para este estudio hemos utilizado los textos de los libros de fisiología vegetal más importantes y las respuestas a un cuestionario para recoger las concepciones de los estudiantes del Máster en Formación del Profesorado de ESO y Bachillerato de Biología y Geología de la Universidad Complutense de Madrid. A diferencia de los manuales de fisiología, las ideas de los estudiantes, del nivel que sea, no se manifiestan abiertamente, por este motivo los investigadores tienen que inferirlas por medio entrevistas, vídeos, grabaciones, o expresiones escritas como las respuestas de cuestionarios que pueden ser de preguntas abiertas, de selección múltiple, de dibujos, esquemas y otras (Wandersee et. al., 1994). En nuestro caso usamos un cuestionario con algunas preguntas de verdadero-falso y otras de selección múltiple para inferir sus ideas.

También resulta importante señalar que en el 2011 presentamos un estudio piloto titulado *“Errores conceptuales sobre la fotosíntesis de las plantas en alumnos de Secundaria de Madrid”*, en el Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales de la Universidad Complutense de Madrid para realizar el Trabajo Fin de Máster (ver Anexo I). Ese estudio previo nos sirvió de guía y base para la preparación de esta tesis doctoral por las siguientes razones:

- Permitió realizar una aproximación al estudio de las concepciones de los estudiantes de Secundaria y Bachillerato sobre la nutrición vegetal en general y, más en particular, sobre la fotosíntesis.

- A partir de las preguntas abiertas pudimos recoger información escrita muy diversa y variada, así como encontrar contradicciones al compararlas con las preguntas tipo test. Esto nos permitió ampliar nuestra visión sobre la problemática de la enseñanza y el aprendizaje de estos dos temas .
- El instrumento para recoger las ideas de los estudiantes pudo ser validado y, a partir de este primer trabajo, realizamos los cambios oportunos para adecuarlo a esta nueva investigación. (Ver cuestionario del estudio piloto en el Anexo 1.)
- El análisis realizado en este estudio nos permitió identificar diferentes orígenes para la producción de estas ideas alternativas, algunas de origen experimental, otras de origen cultural y otras de origen académico.
- La comprobación de una idea expuesta por Pedro Cañal (2005) de que muchas de las ideas alternativas acerca de la nutrición vegetal y, en especial, de la fotosíntesis, aumentan a medida que avanza el nivel académico.
- A partir de los resultados se pudieron identificar algunas incoherencias dentro de los modelos sobre la nutrición vegetal y se propusieron preguntas acerca del origen y, posible solución, del problema.

En resumen, el estudio previo no sólo nos dio mucha información sobre el tema, sino que también nos permitió plantear las preguntas que dieron finalmente origen a esta tesis. Además, pudimos realizar modificaciones importantes en el diseño del cuestionario para los estudiantes del Máster.

3. 1. EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo principal de esta investigación es recoger, analizar y comparar las ideas que tienen los estudiantes del Máster Universitario en Formación del Profesorado de ESO y Bachillerato de Biología y Geología de la Universidad Complutense de Madrid sobre la nutrición de las plantas para evidenciar las dificultades, las confusiones y los preconceptos relacionados con este tema. Además, pretende analizar el esquema y el contenido de los manuales de fisiología vegetal más relevantes y utilizados por los estudiantes de biología con respecto al tema de la fotosíntesis. Nuestro propósito es comprobar si estos libros ofrecen una propuesta coherente sobre este tema y si plantean una visión del proceso fotosintético integrador y global. Por lo tanto, con la investigación pretendemos obtener una visión general de las ideas que transmiten acerca de la nutrición vegetal las dos fuentes de conocimientos principales para los estudiantes: los futuros profesores de Secundaria y Bachillerato y los manuales de fisiología vegetal a partir de los cuales los autores de libros de texto para Secundaria y Bachillerato elaboran sus textos.

Para analizar cualquier tópico dentro de la enseñanza es conveniente distinguir entre los objetivos que proponen los currículos oficiales, las intenciones de los docentes y lo que realmente aprende el alumno. Dicho de otra manera, distinguir entre el currículo prescrito, el impartido y el aprendido (González *et al.*, 2003). Cuando no funcionan bien coordinados surge lo que se denomina el problema de continuidad del currículo (Dusch, 1995). Además, en los currículos oficiales se observa una tendencia a incluir cada vez más contenidos, a la vez que se defiende la importancia de las competencias por encima de los propios contenidos. Pero el problema de la enseñanza, especialmente en algunas disciplinas de enorme importancia actual como, por ejemplo, la formación en ciencias, hace que se aumenten mucho los contenidos en estos campos, cuando el tiempo y los métodos de enseñanza se mantienen con pocos cambios. Y, sin embargo, sabemos que proponer más contenidos no es mejor,

ni siquiera elaborarlos más desde el punto de vista científico, si la puesta en práctica de estos contenidos es poco viable (Pozo & Gómez, 1997).

Como ya se ha expuesto, la nutrición de las plantas, en especial la fotosíntesis y su docencia, es uno de los temas más difíciles de comprender y asimilar por parte de los estudiantes, independiente del nivel educativo en el que se encuentren e, incluso, del sistema educativo o país al que pertenezcan. También se ha comentado la idea, en la que coinciden diferentes autores, de que las causas parecen estar relacionadas con una red de factores interrelacionados (Battinger *et al.*, 1988; Cañal, 1990) como una mala temporalización de los contenidos, por ejemplo se trabajan procesos bioquímicos mucho antes de que los estudiantes tengan conocimientos de química; una formación científica deficiente de los docentes de Educación Primaria que imparten todas las asignaturas en relación a los procesos que requieren conocimientos profundos en biología; insatisfactorias condiciones de trabajo, en los que no hay tiempo para profundizar ni buscar más allá de lo que viene en los libros de texto, inadecuada e insuficiente preparación didáctica; materiales curriculares con planteamientos tradicionales; contenidos no actualizados o con errores en los libros de texto que se utilizan como herramienta principal y casi exclusiva en clase; un esquema rígido de la organización escolar y las influencias negativas del contexto sociocultural cotidiano (Cañal 1990).

Sin embargo, aunque las causas sean diversas y estén interrelacionadas, analizándolas, hemos considerado que hay dos en particular que dificultan cualquier posibilidad o intento de cambiar esta situación. Nos referimos a las abundantes ambigüedades, discrepancias e, incluso, errores conceptuales presentes en los manuales universitarios y a las ideas alternativas e incoherentes de los propios profesores de Secundaria y Bachillerato.

Resulta evidente que si los profesores no tienen los conocimientos acerca del tema que después explican a sus alumnos y alumnas, o si creen entender los

conceptos y procesos pero en realidad no es así, los estudiantes tienen muy difícil la tarea de poder generar un aprendizaje correcto, integrado y significativo acerca de ello. Por tanto, podríamos decir que para cambiar la situación y evitar que aparezcan y se mantengan la enorme cantidad de concepciones alternativas y erróneas acerca de la nutrición vegetal y la fotosíntesis, es muy importante que los propios profesores solucionen sus carencias al respecto. Sin embargo, ¿cómo pueden los profesores adquirir los conocimientos correctos acerca de aquellos temas de los que tienen carencias?, ¿a dónde deberían acudir los profesionales de la enseñanza para aclarar sus dudas acerca de los conceptos de biología? Sin duda la fuente de información más fiable son los manuales específicos de materia, que, en este caso particular, serían los manuales de fisiología vegetal y botánica más completos, importantes y reconocidos. Pero como ya hemos dicho, estos manuales están llenos de discrepancias y ambigüedades al respecto.

De esta manera, nuestro estudio se ha centrado en analizar la situación actual con respecto a estos dos puntos:

1. Análisis de los manuales especializados más influyentes y utilizados para el estudio de la nutrición vegetal y el proceso de fotosíntesis.
2. Estudio de los conocimientos que tienen sobre estos temas los futuros profesores de biología de Secundaria y Bachillerato, a partir del análisis de un cuestionario de preguntas básicas sobre la nutrición autótrofa, la nutrición vegetal, la fotosíntesis y la respiración que se ha pasado a los alumnos que cursan el Máster de Formación del Profesorado en la especialidad de Biología y Geología durante los seis últimos cursos.

3.1.1. Los objetivos

De manera que los objetivos de la investigación son los siguientes:

1. Describir y analizar las concepciones de los alumnos del Máster Universitario en Formación del Profesorado de ESO y Bachillerato de Biología y Geología de la Universidad Complutense de Madrid acerca de la nutrición de las plantas.
2. Analizar la propuesta didáctica de los cinco manuales de fisiología vegetal más relevantes y utilizados por los estudiantes universitarios de biología en Madrid con respecto al tema de la fotosíntesis. Comprobar si estos libros ofrecen una visión integradora y global del proceso fotosintético.
3. Evidenciar las dificultades, las confusiones, los obstáculos y los conceptos en construcción relacionados con la enseñanza y el aprendizaje del concepto de la fotosíntesis.

3. 2. DISEÑO DEL ESTUDIO

Como ya hemos expresado, este estudio se centra en recopilar y describir las concepciones personales de los alumnos del Máster de Formación del Profesorado acerca de la nutrición vegetal y en analizar la propuesta didáctica sobre el tema de la fotosíntesis de los manuales de fisiología vegetal más relevantes.

En el caso de los estudiantes del Máster, la información acerca de las ideas de los estudiantes sobre la nutrición vegetal se recoge dentro de un ambiente natural, sin la manipulación deliberada de los datos, es decir, las concepciones se recogen por medio de un cuestionario dentro del aula (contexto natural) sin

establecer condiciones ni estímulos a los sujetos del estudio (es decir, a los estudiantes). El día y la hora para la administración del cuestionario fue determinado por el profesor de la asignatura de Didáctica de la geología, a excepción del último año que fue la profesora de Didáctica de la biología, puesto que son dos materias comunes para todos los alumnos del Máster de la especialidad de Biología y Geología. Además se tuvo en cuenta que para cuando se pasaran los cuestionarios, todos los alumnos no licenciados o graduados en biología hubieran cursado los contenidos del tema en la asignatura de *Complementos en biología*. De esta manera, todos los años que se pasó el cuestionario, se hizo a finales del periodo académico del Máster, esto es a finales de enero o principios de febrero.

Después, se procedió a examinar con detenimiento el contenido de las respuestas de los alumnos, se hizo una medición numérica para establecer frecuencias y se analizaron para llegar a las conclusiones de la investigación.

3.2.1. Análisis de los manuales universitarios

En la Universidad, los profesores recurren bastante a menudo a apuntes, antes fotocopiados y dejados en reprografía, y ahora en las plataformas virtuales de cada Universidad; sin embargo, los libros de texto especializados, los manuales universitarios específicos de cada rama del conocimiento particular, siguen siendo el recurso principal para obtener la información. En cada asignatura, el primer día, durante la presentación, es común que el profesor presente un listado de libros como “bibliografía recomendada”, animando a los estudiantes a usarlos para completar, comparar y relacionar la información que se va a ir trabajando a lo largo de toda la asignatura.

Cañal, en el Capítulo 2 de su libro *La nutrición de las plantas: enseñanza y aprendizaje* (2005), realiza un análisis en profundidad de los contenidos sobre la

nutrición vegetal en los libros de texto de los niveles de Educación Primaria y de Secundaria obligatoria. Ahí analiza la profundidad con la que estos libros exponen en los diferentes niveles de enseñanza los conceptos relacionados con la nutrición de las plantas, así como su ordenación y la presencia de ideas que el autor considera erróneas o que pueden ser generadoras de conceptos erróneos o alternativos. Ciertamente es que los profesores de estos niveles utilizan el libro de texto como su herramienta principal para impartir las materias, siendo así una de las fuentes de ideas alternativas o erróneas más importantes. Hay, incluso, estudios que ponen de manifiesto que para la mayoría del profesorado de Primaria el libro de texto constituye su “verdadera guía de enseñanza” (Martínez *et al.*, 1998). Al igual que para los profesores de Secundaria, los libros de texto son una referencia básica, llegándolos a considerar muy a menudo como si fueran referencias oficiales (Sánchez & Valcárcel, 2000); lo que parece indicar que para un gran número de docentes, el libro de texto representa el currículo real (Parcerisa, 1996).

Sin embargo, como ya se ha expuesto, son los manuales universitarios especializados en cada rama del conocimiento, las fuentes últimas y más fiables para todos aquellos que busquen información sobre este tema determinado. Además, no podemos olvidar que los autores de los libros de texto para los niveles de Primaria y Secundaria utilizan estos manuales como bibliografía principal para la elaboración de sus textos. De aquí que consideremos a estos tratados la fuente principal del conocimiento formal y que le demos tantísima importancia a que estén elaborados de forma que la información sea expuesta de manera ordenada, constructiva, coherente y sin errores de formulación. Es importante que recordemos que los manuales científicos en general y los libros de textos escolares en particular son materiales esenciales en el proceso de aprendizaje, pues en ellos se trata de aproximar el conocimiento científico al alumno, a través de la correspondiente transposición didáctica (Chevallard, 1985).

Para hacer la investigación en profundidad de los manuales de fisiología vegetal hemos escogido cinco de los manuales más utilizados y representativos en el estudio de esta disciplina por los estudiantes de biología en España:

1. Guardiola Bárcena, (1990). Fisiología Vegetal I: Nutrición y transporte.
2. Barceló Coll, (2003). Fisiología Vegetal.
3. Strasburger, (2003). Tratado de botánica.
4. Lincoln Taiz, (2006). Plant physiology.
5. Azcón-Bieto, (2008). Fundamentos de Fisiología vegetal.

Aunque el libro de Strasburger no es un texto exclusivamente dedicado a la fisiología vegetal sino que es un tratado de botánica, realmente se trata del libro de referencia para los estudiantes que cursan cualquier asignatura relacionada con las plantas, no solo la botánica general. Además, incluye un bloque entero (de los tres en los que se divide) sobre fisiología vegetal, y comparándolo con el resto de libros analizados, con respecto a la profundidad con la que trata el tema de la nutrición vegetal y la fotosíntesis, es de igual interés. Por eso, siendo nuestra intención analizar los textos más relevantes para los estudiantes o para cualquier persona que pretenda encontrar información acerca de este tema, era importante incluirlo.

Para comenzar con el estudio, resulta importante remarcar que, a diferencia de los textos de enseñanza Primaria y Secundaria, los manuales especializados en la fisiología vegetal no incluyen conceptos básicos como el de *nutrición autótrofa*, ni dan explicaciones sobre el proceso general de la nutrición vegetal, ni sobre su *role* en el reciclado de la materia a nivel planetario o ecosistémico. Son textos especializados que parten de la base de que el lector tiene adquiridos unos conocimientos generales básicos y lo que ofrecen es una

profundización a los procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas. Por este motivo no ha sido posible analizar las mismas cuestiones sobre la nutrición vegetal que estudiamos con los cuestionarios utilizados con los estudiantes, que tienen un carácter general y poco especializado; sino que el estudio se ha centrado en el proceso de fotosíntesis en particular, al considerarlo como la fase clave y central de los errores de formulación que después se observan en las preguntas de carácter más general sobre la nutrición vegetal.

Esta parte de nuestro estudio se ha basado en analizar cinco cuestiones en cada uno de los manuales. Aunque este análisis, además, ha buscado errores conceptuales y contradicciones de cualquier tipo dentro del tema de la nutrición vegetal general, no solo en la fotosíntesis, no podemos olvidar que son manuales especializados y que no es fácil encontrar fallos evidentes en el contenido o en los conceptos particulares. Así que, aunque sí se ha podido encontrar alguno, lo que se pretende es comprobar si los textos tratan el proceso de la fotosíntesis de una forma global y coherente, según la concepción científica probada del proceso, en la cual el objetivo de la fotosíntesis sería la producción final de todos los nutrientes orgánicos básicos para el desarrollo de la planta o si, en cambio, se considera que la finalidad de la fotosíntesis es exclusivamente la síntesis de azúcares.

Las cinco cuestiones son las siguientes:

1. Definición general de la fotosíntesis que dan los textos y utilización del esquema de la fotosíntesis dividido en dos etapas.
2. Separación del metabolismo del nitrógeno y del azufre del metabolismo del carbono.

3. Importancia que se da a los procesos de asimilación fotosintética del nitrógeno y del azufre medido según la cantidad relativa de texto que se dedica a estos apartados en comparación con la que se dedica a la del carbono.
4. Relación que se hace entre el metabolismo del nitrógeno y del azufre con la luz y la fotosíntesis dentro del desarrollo de estos temas en particular.
5. Cualquier error en el tratamiento de la fotosíntesis reseñable para la didáctica del proceso en cualquier caso.

3.2.2. Estudio de los conocimientos sobre la nutrición vegetal y la fotosíntesis que tienen los futuros profesores de biología y geología de Secundaria y Bachillerato.

Según Charrier Melillán *et al.*, (2006) el instrumento más utilizado para el rastreo de las concepciones alternativas es el cuestionario. Las razones son su aparente facilidad para la obtención de datos y su utilidad para la descripción y la predicción de un fenómeno (Bizquerra, 2004). Este tipo de estudios permiten recoger información de individuos de diferentes formas y pretenden hacer estimaciones de las conclusiones a la población de referencia.

Según la bibliografía encontrada utilizaron cuestionarios para sus investigaciones sobre fotosíntesis: Soyibo, 1983; Astudillo & Gené, 1984; Bell & Brook, 1984; Driver *et al.*, 1984; Rumelhard, 1985; Cañal & Rasilla, 1986; Stavy *et al.*, 1987; Eisen & Stavy, 1988; Battinger, 1988; Banet & Nuñez, 1990; Cañal, 1990; García Zaforas, 1991; Paccaud, 1991; Vuala, 1991; Songer & Mintzes, 1994; Carignato & Caldeira, 2000; Daleffe *et al.*, 2000; Özay & Öztas, 2003.

Para hacer el estudio de los conocimientos que tienen sobre la nutrición de las plantas los futuros profesores de biología de Secundaria y Bachillerato, se diseñó un cuestionario de preguntas sobre conceptos tan básicos como la nutrición autótrofa, la nutrición vegetal, la fotosíntesis y la respiración. Estos cuestionarios fueron contestados por 186 alumnos que han cursado el Máster de Formación del Profesorado en la especialidad de Biología y Geología en seis cursos consecutivos (2011-12, 2012-13, 2013-14, 2014-15, 2015-16 y 2016-17) en la Universidad Complutense de Madrid, asegurando que para la fecha de realización, aquellos estudiantes que no fueran de la rama de la biología, hubieran cursado la parte de la nutrición de las plantas en la asignatura *Complementos de biología* del Máster. A pesar de que el tamaño muestral pueda parecer pequeño, en realidad corresponde al 94,9% de los estudiantes del Máster de esta rama en la UCM, por lo tanto sí puede considerarse una muestra muy representativa. Solo aquellos alumnos que faltaron a la clase de Didáctica de la geología, o a la de Didáctica de la biología el último año, el día que se pasaron los cuestionarios, no contestaron al cuestionario.

El cuestionario utilizado (Anexo 2) ha sido validado por varios profesores de universidad, varios profesores de biología y geología de Secundaria y Bachillerato, algunos alumnos de 4º curso de biología de la UCM (que ya habían cursado la asignatura de fisiología vegetal y por un profesor de castellano de Secundaria y Bachillerato. El cuestionario se diseñó según los siguientes criterios:

- Indagar sobre aquellas ideas erróneas más representativas y comunes en los estudiantes de Secundaria, en base a otras investigaciones y a nuestro propio estudio previo, acerca de los procesos de fotosíntesis y respiración celular de las plantas. Consideramos importante comprobar si los futuros profesores cometen algunos de los errores que los alumnos de los niveles para los que se están formando como profesores.

- Preguntar también por conceptos generales acerca de la nutrición vegetal para intentar localizar si el problema sobre la comprensión de la fotosíntesis y su confusión constante con la respiración se encuentra en los conceptos más básicos.
- Ser sencillo de entender y de responder en lo referente al esfuerzo que deben realizar los estudiantes del Máster de Formación del Profesorado para hacerlo. Por lo tanto, el cuestionario debía ser corto para que no les llevara mucho tiempo, con preguntas de verdadero y falso, y de tipo test. La razón es que el grupo muestral es bastante pequeño y resultaba importante que respondieran todos, además de que lo hicieran de forma homogénea de la que poder sacar algún tipo de tendencia.
- Ser poco especializado. Que no hiciera falta un conocimiento profundo de la materia para poder contestar a las preguntas. Pues lo principal es que lo hagan todos los estudiantes del Máster independientemente de lo bien que aprendieron y recuerdan los contenidos de fisiología vegetal. Además, esto tenía una segunda ventaja, y es que más adelante el estudio se podía extender a otros niveles educativos para comprobar el estado de la cuestión.
- Por último tenía que permitir comparar las respuestas ofrecidas en preguntas diferentes que en realidad indagaban sobre los mismos conceptos para ver el nivel de significación de estas ideas en los futuros profesores. La idea es comprobar si los estudiantes cambian de respuesta según cómo se formula la pregunta, siendo esto un signo de desestructuración del aprendizaje.

3.2.3. Descripción del cuestionario utilizado

Con el fin de comprender bien las ideas y conceptos que encierran cada una de las preguntas del cuestionario, a continuación se ofrece un análisis de las preguntas y de las respuestas que se esperan, por el orden en el que se encuentran en el cuestionario que responden los encuestados.

Como se puede observar en el Anexo 2, el cuestionario se divide en dos partes bien diferenciadas. La primera parte contiene 6 afirmaciones en las que los encuestados deben marcar si son verdaderas o falsas y la segunda parte está compuesta por 8 preguntas con tres o cuatro posibles respuestas en cada caso.

I. Marca V o F según sean Verdaderas o Falsas a las siguientes afirmaciones:

1. La finalidad del abono es aportar los nutrientes orgánicos necesarios para la planta.

Las plantas son seres autótrofos, lo que significa que sintetizan materia orgánica a partir de materia inorgánica gracias al aporte de energía desde una fuente externa, que en el caso de las plantas es el Sol. Pero lo importante es comprender que el fin la nutrición, de cualquier nutrición, ya sea autótrofa o heterótrofa, es utilizar los nutrientes para mantener las funciones vitales del cuerpo y su homeostasis. La única diferencia entre ellas es de dónde obtienen los nutrientes orgánicos. Los heterótrofos los obtienen directamente del medio, ya que son incapaces de sintetizarlos a partir de moléculas inorgánicas, mientras que los autótrofos pueden fabricar esa materia orgánica para luego usarla como nutrientes de los que, por ejemplo, obtener energía a través de la respiración o generar sus propios tejidos. Por tanto, el abono no aporta esos nutrientes orgánicos. El abono, realmente, sirve para dar a las bacterias

mineralizadoras su “alimento” y que estas “enriquezcan” el suelo con los minerales que las plantas necesitan.

Lo que se puede deducir a partir de esta pregunta es si los futuros profesores comprenden de verdad lo que es la nutrición autótrofa ya que no cabe duda de que si la pregunta fuera si las plantas son seres autótrofos o heterótrofos, todos contestarían correctamente.

2. Es peligroso dormir con plantas por la noche porque consumen el oxígeno.

Las plantas respiran por lo que es cierto que consumen el oxígeno y expulsan el dióxido de carbono producido mediante esta actividad. Lo importante es saber que respiran durante todo el día, ya que la finalidad de la respiración es la obtención de energía y la energía es necesaria para la mayoría de las actividades celulares. Lo que ocurre es que por el día la liberación del oxígeno producido mediante la fotosíntesis excede a su consumo, mientras que por la noche la actividad fotosintética se paraliza y solo se detecta su consumo. El problema de la frase es el adjetivo “peligroso” puesto que dormir con plantas no es más peligroso que dormir con tu hermano o con tu perro. De hecho, mucho menos, ya que la tasa metabólica (de consumo de oxígeno) por parte de las plantas es muchísimo menor que la de cualquier animal de vida activa. No se considera peligroso dormir con otro ser humano en la misma habitación, tampoco puede considerarse peligroso dormir con una planta.

Esta idea, como ya se ha comentado, proviene del siglo XVIII, con el investigador holandés Ingenhousz. Cañal (2005) ya señala esta idea como uno de los preconceptos típicos sobre la fotosíntesis y la respiración de las plantas y defiende que su raíz debe ser la transmisión de ideas populares de padres a hijos. Veremos si la enseñanza y la formación científica ayudan a eliminar esta idea o si, por el contrario, sigue presente en los futuros profesores.

3. Las plantas obtienen todos los componentes inorgánicos que necesitan del suelo.

Ocurre a menudo que los alumnos olvidan el papel fundamental del CO₂ en el proceso de fotosíntesis puesto que es la fuente de carbono para la síntesis de todas las moléculas orgánicas que la planta fabrica. Para ellos es sencillo recordar que las plantas necesitan agua, puesto que lo ven en su día a día y también les resulta sencillo recordar que del suelo toman las conocidas sales minerales (aunque no tengan ni idea de lo que son). Sin embargo olvidan que el CO₂ lo absorben por los estomas puesto que está en el aire.

4. La síntesis de aminoácidos para formar proteínas forma parte del proceso fotosintético.

Siempre se explica que el producto final de la fotosíntesis es la glucosa, pero ¿de dónde sacan las plantas entonces el resto de nutrientes orgánicos que necesitan? La discusión sobre si forma parte del proceso fotosintético sigue vigente hoy en día entre los especialistas y los profesores, a pesar de que en los años 50 el mismo Melvin Calvin realizó estudios en los que determinó que así era y C. Vicente en su libro *Fisiología Vegetal* (1976) también lo especifica. Puede ser que este punto sea el más controvertido. Por eso, y aunque no se recoge como datos formales, se realizaron entrevistas a tres profesores del departamento de fisiología vegetal de la Facultad de biología de la Universidad Complutense de Madrid, entre ellos a Carlos Vicente de Córdoba en calidad de Catedrático de Fisiología Vegetal de la UCM. Carlos Vicente (entrevistado el 7 de noviembre del 2011) defendió la idea de que gracias a la fotosíntesis se fabricaban las moléculas orgánicas que la planta necesita y que él lo explica así en sus clases. Explicó que realmente lo que se consigue mediante el proceso fotosintético es atrapar la energía lumínica del Sol en moléculas de ATP y poder reductor para después usarlos para cualquier ruta metabólica que

la planta necesitara. Una de esas rutas sería la síntesis de glucosa y otras serían la síntesis de aminoácidos. Puso de ejemplo también las plantas C-4 cuya molécula estable primaria no es un azúcar sino un aminoácido. Expresó claramente su disconformidad con los libros y la transmisión del conocimiento sobre la fotosíntesis que desligaba o separaba la síntesis de glúcidos (sobre todo de la glucosa) de la producción de proteínas y lípidos; y explicó que, en su opinión, la razón de esta separación no es que los profesores de fisiología vegetal no lo supieran o no estuvieran de acuerdo, sino es que, simplemente, “siempre se ha explicado así” y hay mucha resistencia a cambiarlo. Los otros dos profesores entrevistados estuvieron de acuerdo en que con las moléculas creadas a partir de la fase puramente fotosintética después se sintetizaban glúcidos, pero también lípidos y proteínas. La razón para separar en temas distintos lo que suele llamarse “asimilación de nitratos y sulfatos” es, según su opinión, exclusivamente práctica. Primero se explica la fotosíntesis de los glúcidos, se trabaja en profundidad, con todos los factores ambientales, sus enzimas y sus diferentes rutas ya sean plantas C-3, C-4 o CAM, y se hacen problemas. Esto es largo y requiere de varias unidades didácticas, aunque todas se incluyan bajo el epígrafe de “Fotosíntesis”. Normalmente, al final del temario se tratan los temas de la asimilación de nutrientes minerales, por ser un tema más corto y de “menor importancia” en la planta (no olvidemos que más el 90% del peso seco de una planta son glúcidos), pero sí que se dice que para asimilar estos nutrientes se utiliza el ATP y el poder reductor generados durante la fase fotosintética del proceso de fotosíntesis y que esta asimilación tiene lugar en los cloroplastos. Así que, consideran, que sí que se deja claro que estas rutas metabólicas forman parte del proceso fotosintético y que los alumnos lo deberían unir y ordenar correctamente en su cabeza. Así que parece que los especialistas en la materia están de acuerdo en que en realidad, gracias al proceso de fotosíntesis, la planta genera todos los nutrientes orgánicos que necesita.

5. Las raíces son la boca de las plantas.

Esta idea también es bastante antigua. De hecho podríamos decir que procede de la época de Aristóteles, hace más de 2000 años, en el que se intentaba dar explicación a los fenómenos y a las actividades de las plantas solapando el modelo más conocido que era el animal. Es lógico pensar que los estudiantes con poca formación científica tiendan a pensar de esta manera; es la reacción más lógica a la falta de conocimientos, intentar explicar el mundo a través de lo que se sabe. Sin embargo, cabe esperar que en el momento en el que los estudiantes comienzan a formarse en ciencia y estudian las plantas, su morfología, sus partes y su modo de vida, consideren que las plantas no tienen boca, igual que los animales no tienen hojas. Por tanto, el hecho de querer buscar estructuras propias del modelo anatómico animal en las plantas resulta un error. Las plantas no tienen boca, como no tienen ojos, ni uñas, ni estómago (aunque Aristóteles también defendió que el estómago de las plantas era el suelo, desde el cual cogían directamente los nutrientes ya digeridos). Su funcionamiento y sus estructuras simplemente son distintas. En cualquier caso, si lo consideráramos una metáfora más digna de la poesía que de ningún texto científico, seguiría siendo incorrecto ya que las plantas también se alimentan (toman materia de la que extraer los nutrientes del medio externo) del CO₂ de la atmósfera, y esto lo hacen por las hojas, y, sin embargo, nadie las consideraría "bocas".

6. La fotosíntesis se realiza por el día y la respiración, en cambio, por la noche.

Como se ha explicado anteriormente, las plantas respiran durante todo el día, ya que la respiración es el proceso mediante el cual los seres vivos extraen la energía de los nutrientes orgánicos. Sin embargo, en lo que se refiere a la fotosíntesis, una fase requiere de energía lumínica para producirse por lo que,

en líneas generales, podríamos decir que se da durante el día y cesa por la noche.

II. Marca la opción correcta:

7. ¿Cuál es la finalidad de la fotosíntesis?

- A. Producir oxígeno.**
- B. Producir carbohidratos como la glucosa.**
- C. Producir todos los nutrientes orgánicos (carbohidratos, aminoácidos, ácidos grasos y bases nitrogenadas)**
- D. A y B son correctas.**

Esta debería ser una de las preguntas más sencillas puesto que en biología nos centramos y remarcamos el binomio estructura-función con insistencia; lo que quiere decir que saber la función de cualquier proceso es primordial y, podríamos decir que, incluso, lo más importante; mucho más, sin duda, que conocer las reacciones químicas que lo conforman.

Sin embargo en la bibliografía se ha encontrado que la idea de que el objetivo de la fotosíntesis es la de producir oxígeno está muy presente en los estudiantes. Por supuesto, resulta importante remarcar a los alumnos y alumnas la importancia de la fotosíntesis como proceso productor de oxígeno y, más hoy en día, cuando uno de los temas más urgentes en la educación sería la concienciación ambiental. Pero no se puede confundir esto con la función de la fotosíntesis que contesta a la cuestión de para qué realizan las plantas este proceso. Obviamente no lo hacen para producir una sustancia de la que se deshacen, ya que la expulsan al medio. Si la desechan es porque no la quieren, por lo tanto, el objetivo del proceso no puede ser su fabricación; aunque a nosotros (como a la mayoría de los seres vivos de este planeta), como organismos aerobios que somos nos venga bien.

La función de la fotosíntesis va muy ligada al concepto de nutrición y al concepto particular de nutrición autótrofa. La nutrición la podríamos definir como el conjunto de procesos que llevan a cabo los seres vivos con el objetivo de obtener los nutrientes necesarios para generar estructuras, obtener energía y regular los procesos para el mantenimiento de su homeostasis. Para esto son necesarios nutrientes inorgánicos, como el agua y las sales minerales, y los nutrientes orgánicos, tradicionalmente glúcidos, lípidos, proteínas y vitaminas. Y es, precisamente, la manera de obtener los nutrientes orgánicos lo que hace que existan dos tipos de nutriciones, la autótrofa y la heterótrofa. Así pues, la definición de organismos autótrofos que se propone es la de aquellos organismos capaces de fabricar materia orgánica (rica en energía útil) a partir de materia inorgánica (pobre en energía útil) gracias al aporte de una energía externa (que en el caso de las plantas es la energía lumínica del Sol). Bajo este prisma resulta sencillo de entender que todo lo que la planta necesita para su nutrición pero no toma directamente del medio, lo fabrica ella. De forma que, la fotosíntesis se puede contextualizar como la manera de obtener esos nutrientes orgánicos que necesitan para regular procesos, obtener energía y generar estructuras (crecer generando nuevas estructuras o reparar las dañadas). Sería una fase dentro la nutrición vegetal, una fase previa a la utilización de esos nutrientes orgánicos por parte de las células vegetales.

Aparte de todo esto, habría que añadir que el role de los autótrofos dentro del ciclo de la materia es bastante más importante y fundamental para la vida en la Tierra que la producción de oxígeno. Existe vida anaerobia, pero no existe la vida sin materia orgánica. Los alumnos no le dan la misma importancia porque en su día a día se hace muy presente la idea de que si no respiramos (no introducen O_2), nos morimos rápidamente. Mientras que la falta de comida se enseña en otros contextos y se asocia a problemas económicos, sociales o políticos, no a su ausencia en el planeta. Además, incluso en las películas o en los libros, una persona podría encontrarse en un planeta sin vida y aguantar bastantes días, mientras que si se quita el casco y la atmósfera no posee oxígeno, moriría.

8. ¿Para qué sirven las sales minerales como los nitratos y sulfatos?

- A. Como cofactores de las reacciones de oxido-reducción.**
- B. Como sustratos que reducir hasta componentes orgánicos en el proceso fotosintético.**
- C. Para formar parte de los fotosistemas.**
- D. Para que funcionen las bombas y los diferentes transportes de las células.**

Como norma general los alumnos saben que las plantas toman del suelo el agua y las sales minerales pero si se les pide que digan para qué son necesarias no lo saben. Lo realmente curioso es que en la mayoría de los libros de biología donde se explica la fotosíntesis (por no decir en todos), en el dibujo de la planta en el suelo a la que le da la luz del Sol, siempre aparecen las sales minerales tomadas por las raíces; pero en la parte del texto, cuando se explica el proceso y se escribe la fórmula general o resumen, no vuelven a aparecer (Cañal, 2005).

Después de lo explicado en la pregunta anterior sabemos que las plantas (siempre por norma general, ya que la biología está llena de excepciones) no toman del medio las moléculas orgánicas que necesitan para su nutrición, sino que solo toman materia inorgánica. Así pues, transforman una parte de esta materia inorgánica en orgánica. Cuando trabajamos el tema de las biomoléculas y los bioelementos solemos decir que hay seis bioelementos primarios o fundamentales que son el carbono, el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno, el azufre y el fósforo. Esto quiere decir que con estos seis elementos se pueden constituir la mayoría de las biomoléculas. Cuando la planta toma agua está introduciendo carbono y oxígeno, cuando toma dióxido de carbono introduce carbono y oxígeno, pero ¿cómo obtiene el azufre, el nitrógeno y el fósforo? Mediante las sales minerales. Con esta idea, resulta sencillo comprender que las sales minerales como los nitratos y los sulfatos sirven para ser reducidos y generar los nutrientes orgánicos que la planta necesita además

de la glucosa, que solo está formada de C, H y O. Por ejemplo los aminoácidos necesitan, además, azufre y nitrógeno.

9. ¿Qué es el CO₂ para las plantas?

- A. El gas que usan en el proceso de la respiración.**
- B. Un alimento esencial.**
- C. Un gas inútil que expulsan por los estomas.**
- D. El compuesto que transforman en oxígeno en el proceso de fotosíntesis.**

Las opciones A, C y D son claramente falsas, pero la B es muy controvertida. Con esta pregunta podríamos entrar en la eterna discusión de qué es un alimento. El problema de la diferencia entre nutriente y alimento, y, sobre todo, de la definición de alimento, es destacado como uno de los factores que dificulta el aprendizaje y la comprensión de los procesos relacionados con la nutrición vegetal según Cañal (2005). A menudo se presenta como un concepto que solo puede aplicarse al reino animal, como aquellas sustancias o cuerpos que se introducen desde el medio y a partir de los cuales se extraen u obtienen (por medio de la digestión) los nutrientes. Por ejemplo, una pera sería un alimento muy rico en ciertos nutrientes como los glúcidos, el agua y las vitaminas.

Con esta definición observamos diferentes características de los alimentos:

Sustancias que se toman desde el medio externo y se introducen en el cuerpo.

Sustancias complejas, formadas de otras más sencillas (nutrientes) que son las que interesan realmente al organismo y a sus células; por lo tanto deben ser rotas, degradadas, digeridas para obtener esos nutrientes.

El problema viene cuando nos preguntamos por el alimento de aquellos seres vivos que no poseen aparato digestivo y toman del medio ya las sustancias “digeridas” o que, por el motivo que sea, no necesitan ser rotas, porque estas

sustancias ya tienen el tamaño de “nutriente” (entendido como sustancia asimilable por las células). ¿Podríamos considerar que eso es un alimento? ¿Qué característica es la que define realmente al alimento, que se toma del medio o que debe ser digerido? Quizá las dos características son fundamentales para que podamos considerar que una sustancia es un alimento. En ese caso, las plantas no toman alimentos del medio, a excepción de las carnívoras.

Se puede observar que la RAE no diferencia entre alimento y nutriente. En los diccionarios especializados en ciencias no se encuentra la palabra alimento pero podemos encontrar otras palabras relacionadas y leer lo siguiente:

- Diccionario de biología (Diccionarios Oxford-Complutense, 1998):
 - Nutriente: Cualquier sustancia requerida en la alimentación de un organismo, proporcionando una fuente de energía a sus componentes estructurales. En los animales, los nutrientes forman parte de la dieta, e incluyen nutrientes mayores, como son los carbohidratos, las proteínas, y lípidos, además de vitaminas y ciertos minerales. Los nutrientes vegetales son el dióxido de carbono que toman de la atmósfera y el agua (que además contiene minerales) que absorben a través de sus raíces desde el suelo, y se dividen en macronutrientes y micronutrientes.
 - Alimentación: V. ingestión
 - Ingestión: (alimentación) Forma de nutrición heterótrofa en la que el alimento es tomado por un organismo y después digerido. La ingestión es el principal mecanismo de la nutrición animal.

- Nutrición: Proceso por el que los organismos obtienen energía (en forma de alimento) para el crecimiento, el mantenimiento y la reparación.(...)
 - Nutrición autótrofa: Tipo de nutrición en la que los organismos sintetizan los materiales orgánicos que necesitan, a partir del material inorgánico del que se alimentan. Las fuentes principales para el carbono y el nitrógeno son el dióxido de carbono y los nitratos, respectivamente. (...)
- Diccionario Esencial de las Ciencias (Espasa, 1999):
- Nutriente: Elemento del agua o del suelo que plantas y animales son capaces de ingerir y asimilar como alimento.
 - Ingestión: Tipo de nutrición heterotrófica en la que el organismo capta el alimento y posteriormente lo transforma, por acción de las enzimas digestivas, en productos asimilables más sencillos. Es el mecanismo principal de la nutrición animal.
 - Nutrición: Proceso por el que los organismos utilizan el alimento para la obtención de la energía relativa al crecimiento, mantenimiento y reparación. (...).
 - Nutrición autótrofa: Tipo de nutrición en la que los organismos sintetizan sus indispensables materiales orgánicos a partir de las fuentes inorgánicas. Las principales fuentes de C y de N son, respectivamente, el CO₂ y los nitratos. (...)

Como podemos comprobar en estos dos diccionarios especializados no podemos encontrar el concepto de alimento. El de alimentación, por su parte, te lleva a otro concepto considerado sinónimo (ingestión) o no aparece. En el

caso del diccionario de biología, donde aparece como sinónimo de ingestión, utiliza la palabra alimento para definir este proceso de forma que hace difícil su comprensión. En este caso, si nos ciñéramos a la definición de ingestión como sinónimo de alimentación ambos diccionarios coinciden en que es un concepto que se puede asociar exclusivamente a los animales, con nutrición heterótrofa y con aparato digestivo puesto que incluye la necesidad de digerir mediante enzimas digestivas aquello que se ha ingerido.

Sin embargo, examinando el concepto de nutrición autótrofa que da el mismo diccionario de biología observamos que considera que las plantas se alimentan de materia inorgánica, dando a entender que alimento es todo lo que se toma del medio y se introduce en el cuerpo para después obtener los nutrientes que las células asimilan. En cualquier caso, es una contradicción clarísima.

Centrándonos en el diccionario de biología de Oxford-Complutense (1998) podemos comprobar que aún se vuelve más liso cuando en la definición de nutriente dice: *“Cualquier sustancia requerida en la alimentación de un organismo, proporcionando una fuente de energía a sus componentes estructurales.”*; mezclando así la nutrición y la alimentación, dos procesos que no deberían confundirse (Cañal, 2005); y reduciendo las funciones de los nutrientes a la función energética exclusivamente, olvidando así la existencia de nutrientes estructurales y reguladores. Además, si aceptáramos esa definición de nutriente y lo relacionáramos en el de alimentación (o ingestión) veríamos que solo los seres heterótrofos (que ingieren alimentos y los digieren posteriormente) interactúan con las sustancias que pueden definirse como alimento. Por lo tanto, el concepto de nutriente también quedaría reservado para estos. Sin embargo, el texto explica que los nutrientes son diferentes en el caso de los vegetales y animales, considerando que en el caso de los vegetales son el agua, las sales minerales y el CO₂; mismas sustancias que después considera alimentos en la definición de nutrición autótrofa.

Una vez más, analizando las definiciones de nutrición de ambos diccionarios encontramos que solo se refieren a las necesidades energéticas de los seres vivos, además de considerar que para realizar los procesos de crecimiento, mantenimiento y reparación lo que se necesita es energía, no moléculas para formar las estructuras, por ejemplo.

En general, si queremos salir de dudas, este tipo de diccionarios especializados no nos valen. Cuando buscamos en libros de texto, hay que usar libros de biología elemental ya que en los manuales especializados de temas en biología no discuten sobre esto que parece tan básico.

- Biología y Geología de 3º de la ESO de Edelvives (García & Hoyas, 2015):
 - Alimentos: Son los productos que se toman, procedentes de otros seres vivos.
 - Nutrientes: Se trata de las moléculas más sencillas, contenidas en los alimentos, que son necesarias para el mantenimiento de la vida.
 - Alimentación: Proceso consciente y voluntario mediante el cual se toman alimentos del exterior.
 - Nutrición: Proceso complejo, inconsciente e involuntario, por el que los alimentos se transforman en nutrientes. Estos nutrientes llegan a todas las células del organismo para su uso.

o Biología y Geología de 3º de la ESO de SM (Pedrinaci *et al.*, 2015):

- Alimentos: Sustancias que tomamos del medio y de las que obtenemos los nutrientes.
- Nutrientes: Constituyen la materia prima con la que las células fabrican sus propios componentes y aportan el combustible necesario para obtener energía.

El libro añade: *“Los seres vivos incorporamos materia y energía del medio que nos rodea y nuestro cuerpo las transforma y usa para crecer, moverse, reproducirse...(…). Este complejo proceso se denomina nutrición.”*, y continúa más adelante diciendo: *“De los alimentos conseguimos nutrientes como el agua o la glucosa. Los alimentos suelen ser sustancias muy complejas que hay que transformar en el sistema digestivo para lograr los nutrientes. (...) Con frecuencia se reserva el término alimento para aquellas sustancias que incorporamos a través del sistema digestivo.”*

Esto es solo una aproximación casi anecdótica del verdadero caos que hay alrededor de estas parejas de conceptos, alimentación-nutrición y alimento-nutriente. Pedro Cañal en su libro *La nutrición de las plantas, enseñanza y aprendizaje* (2005) lo analiza y desarrolla en profundidad, llegando a proponer una definición para estos conceptos que creemos acertada:

- Alimentación: Proceso en el que un organismo obtiene alimentos de su entorno y consigue, a partir de dichos alimentos, los nutrientes que necesitan sus células, que serán transportados hasta la proximidad de las mismas.
- Alimento: Todo tipo de sustancia presente en el medio, sea químicamente simple o compleja, sea energética o no y sea sólida, líquida o gaseosa, que un ser vivo puede utilizar como

fuelle de los nutrientes que necesitan las células para desarrollar sus funciones vitales.

De esta manera el proceso de nutrición incluiría la incorporación de sustancias (alimentos) desde el entorno del organismo, proceso que denominaría alimentación. Esos alimentos, tengan la naturaleza química que tengan, se usarán para obtener los nutrientes que serían las sustancias que alcanzarían las células para ser asimiladas por estas. Para obtener los nutrientes a partir de los alimentos los seres vivos pueden necesitar digerirlos o transformarlos en otras sustancias, pero lo que hace que sean alimentos es su característica de ser introducidas desde el medio externo. Así pues el CO_2 sería un alimento esencial para las plantas ya que constituye su fuente de carbono para la síntesis de toda la materia orgánica.

En consecuencia las definiciones de nutrición autótrofa tan utilizadas y conocidas por los estudiantes de que las plantas fabrican su propio alimento y que se alimentan por sí solas, son dos frases que no tienen cabida. Las plantas no pueden fabricar su alimento ya que no fabrican aquella materia que toman del medio que las rodea. Además, obviando esta definición, y considerando algunas de las definiciones antes expuestas sobre el alimento como sustancia energética que debe ser degradada en otras más sencillas para la obtención de energía, tendríamos que incluir la fabricación de moléculas como el almidón (molécula que fabrican las plantas mediante el proceso de fotosíntesis) pero también el glucógeno que fabricamos nosotros a partir de las moléculas de glucosa. Y sobre la frase que dice que se alimentan por sí solas, podríamos decir que a excepción de las personas impedidas o los bebés, todos nos alimentamos (introducimos los alimentos en nuestro cuerpo) por nosotros mismos, sin ayuda.

10. Sobre las células de las plantas, ¿cuál de estas afirmaciones es correcta?

- A. Todas las células de las plantas son células vegetales, tienen cloroplastos y metabolismo autótrofo.**
- B. No todas las células de las plantas tienen cloroplastos, por lo tanto, estas células sin cloroplastos tienen un metabolismo heterótrofo.**
- C. Todas las células de las plantas tienen metabolismo autótrofo pero no todas tienen cloroplastos.**
- D. Todas las células de las plantas tienen metabolismo autótrofo excepto las de las plantas carnívoras.**

Otra de las contradicciones más básicas en la biología es la idea de que existen dos modelos eucariotas de organización celular: la célula animal y la célula vegetal. Este es un tema que se trabaja en todos los niveles en los que se estudia biología hasta 2º de Bachillerato y, aunque introduzca nuevos conceptos y otros los trabaje con una mayor profundidad, nada cambia en lo referente a los tipos de organización celular y a las características que las diferencian. En líneas generales podríamos decir que las diferencias básicas entre las células animales y vegetales es que estas últimas poseen una pared celular rígida (de celulosa) por fuera de la membrana plasmática, suelen poseer vacuolas gigantes, carecen de centrosomas y presentan unos orgánulos propios de color verde denominados cloroplastos, cuya función es realizar la fotosíntesis. Además cuando se habla de las funciones celulares se explica que la nutrición heterótrofa es propia de las células animales mientras que la nutrición autótrofa es propia de las células vegetales. Bajo este prisma, ¿qué ocurre con las células de los hongos? ¿Son células animales o vegetales? Si lo característico es la presencia de pared celular, estos también la tienen, aunque no de celulosa. ¿Tienen por tanto células vegetales? Si nos centramos en la presencia de cloroplastos y su tipo de nutrición, los hongos tendrían células animales. En los libros suelen considerarse a los hongos más cercanos a los animales que a las plantas, quizá por la importancia que se da al tipo de nutrición (los hongos son seres heterótrofos puesto que no son

capaces de sintetizar materia orgánica a partir de materia inorgánica y por lo tanto toman del medio las sustancias orgánicas que necesitan para su nutrición). En este tema también se podría considerar algo sobre lo que merece la pena debatir y llegar a un acuerdo pero este estudio se centra en la problemática con la nutrición vegetal y a este respecto, si damos por correcta la idea de que los hongos tendrían un tipo de célula animal por carecer de cloroplastos y ser seres heterótrofos, ¿qué pasa con aquellos tejidos vegetales que no poseen cloroplastos? El ejemplo más conocido es de las células de la raíz, aunque aquí se incluyen las del tronco de las plantas leñosas, las hojas modificadas de las flores como los pétalos y los frutos. ¿Serían estas células animales por carecer de cloroplastos? Todos pensamos que esto es un sinsentido; estas células son también vegetales, pero ¿qué tipo de nutrición presentan?

En este punto, y recordando lo expuesto en la pregunta anterior, cabe decir que el concepto de nutrición solo puede aplicarse al organismo completo, ya que incluye diferentes procesos para los que puede tener células, tejidos, órganos o, incluso, aparatos y sistemas, especializados. Así pues lo correcto sería hablar del tipo de metabolismo que tiene una célula animal o una vegetal, ya que éste sí depende exclusivamente de la célula, de sus orgánulos y sus enzimas.

Como ya hemos dicho, existen células vegetales que no poseen cloroplastos. Por lo tanto, esas células que no poseen cloroplastos, como las de la raíz, poseen un metabolismo heterótrofo, incapaces de sintetizar moléculas orgánicas a partir de moléculas inorgánicas.

11. Sobre la fotosíntesis y la respiración, ¿cuál de estas afirmaciones es correcta?

- A. Las plantas no necesitan respirar cuando hay luz porque ya obtienen la energía que necesitan de las reacciones fotosintéticas, por lo tanto solo respiran por la noche.**
- B. La fotosíntesis es el proceso contrario a la respiración al ser el proceso productor de oxígeno y consumidor de CO₂.**
- C. A y B son incorrectas.**
- D. A y B son correctas.**

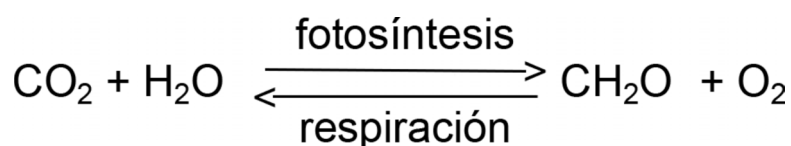
Como ya se ha expuesto en el Capítulo del Marco teórico, estas nociones provienen del siglo XVIII y es una de las ideas alternativas más características y más presentes en los estudiantes sobre los temas de fotosíntesis y respiración.

Tanto la fotosíntesis, como la respiración son procesos imprescindibles para el desarrollo completo de nutrición vegetal, ya que con la fotosíntesis se generan los nutrientes orgánicos que después, en la respiración, se utilizarán para la extracción de energía. Igualmente, recordemos que los nutrientes orgánicos que fabrican los vegetales no solo sirven para obtener energía, sino que sobre todo (en los vegetales) sirven para generar biomasa (generar nuevas estructuras y crecer), además de para regular procesos y mantener la homeostasis (por ejemplo los niveles osmóticos correctos para el buen funcionamiento de numerosas actividades vegetales). La energía que se acumula durante la fase propiamente fotosintética de la fotosíntesis (a partir de la transformación de energía solar en química en forma de ATP) tiene como finalidad la producción de los compuestos orgánicos mediante la reducción de los compuestos inorgánicos. Así pues, y como ya se explicó en el comentario de la pregunta 2, las plantas respiran durante todo el día.

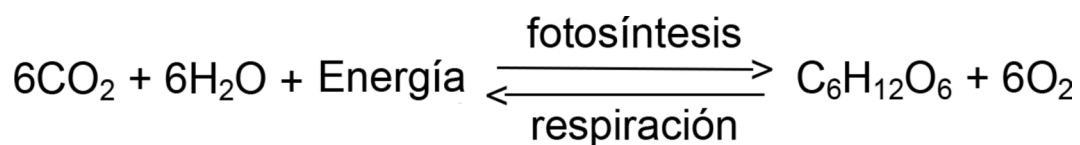
Sobre si ambos procesos son contrarios, la respuesta es un no rotundo. La explicación más sencilla sería que los objetivos de ambos procesos no son

contrarios. El de la fotosíntesis es generar las moléculas orgánicas para que las células puedan realizar sus funciones y la de la respiración es obtener energía. De hecho, ambos procesos se encuentran dirigidos hacia un mismo objetivo, llevar a cabo la nutrición vegetal en su conjunto. Es más, sin la fotosíntesis, no podría darse la respiración, ya que mediante ella se obtienen, entre otras moléculas, los glúcidos como la glucosa, que después puede utilizarse en la respiración. Por lo tanto, sería mejor considerar a la fotosíntesis como una fase anterior a la utilización de los nutrientes que sería una fase posterior, en la que se encontraría la respiración como un proceso minoritario para los vegetales, si lo comparamos con el uso de los nutrientes en la producción de biomasa. De nuevo, bajo este punto de vista, no son procesos contrarios ya que la totalidad de la glucosa obtenida gracias a la fotosíntesis no se respira, sino que en su mayoría se usa para el crecimiento.

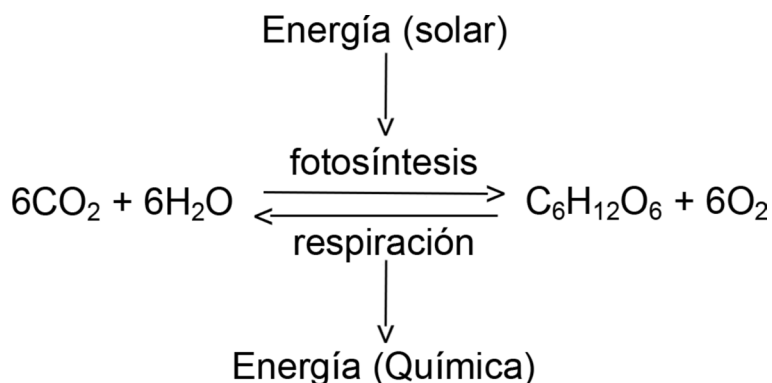
Esta idea sigue manteniéndose, en parte, porque los libros de texto suelen relacionar ambos conceptos en una imagen resumen en la que los dos procesos son separados por una flecha de doble sentido:



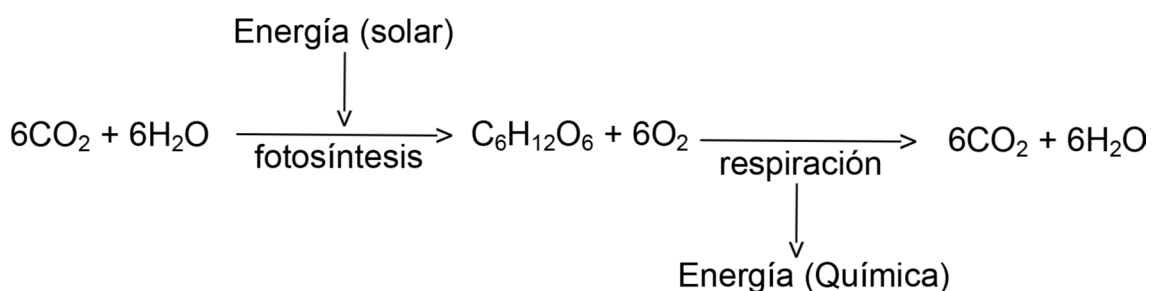
Aunque lo más normal es que la expresen directamente con la fórmula de la glucosa ajustada e incluyendo la energía:



O, en el mejor de los casos, mostrando que la energía necesaria para la fotosíntesis proviene del Sol, mientras que la que se obtiene mediante la respiración celular es energía química, en forma de ATP:

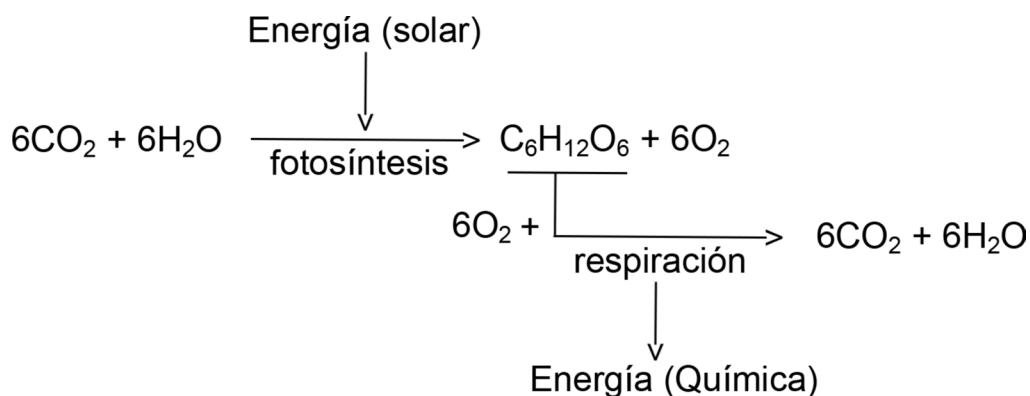


Sin embargo, en realidad la finalidad de la fotosíntesis, según esta fórmula y sin entrar aún en el tema del “monopolio de la glucosa” como único producto sintetizado mediante la fotosíntesis, podríamos decir que es la producción de glucosa; mientras que el objetivo de la respiración celular es la obtención de energía química (en forma de ATP). Desde este punto de vista, no son procesos contrarios, ni lo que hace uno lo “deshace” el otro. Sino que la fotosíntesis persigue fabricar componentes orgánicos (glucosa, en este caso), ricos en energía de enlace (energía química), que después podrán ser utilizados para la obtención de la energía que poseían gracias a su degradación. De esta manera sería mucho más correcto expresar esta relación entre la fotosíntesis y la respiración de la siguiente manera:



El motivo de no utilizar dos flechas en sentidos opuestos es crítico a la hora de comprender ambos procesos en su contexto. La relación, pues, entre ambos sigue un flujo lineal, donde los productos obtenidos en la fotosíntesis son utilizados, posteriormente, como sustratos a oxidar.

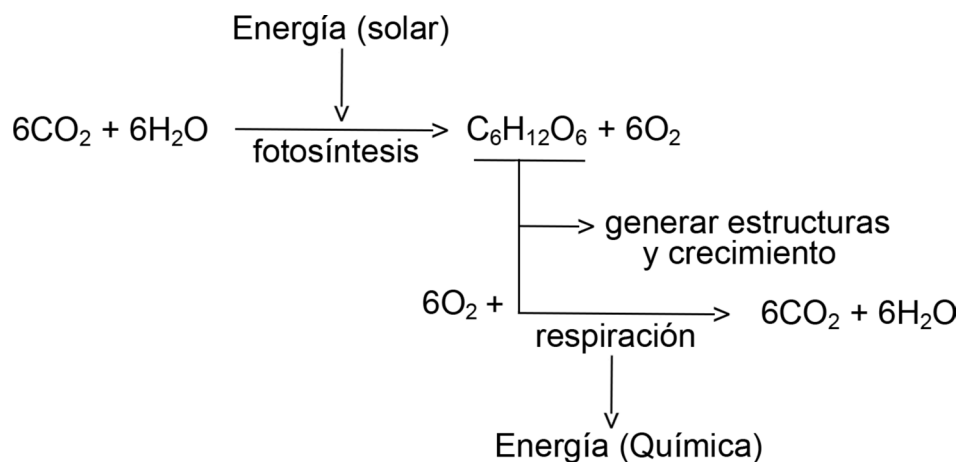
Aún así, este esquema muestra otras dos ideas que pueden llegar a ser erróneas con respecto a la relación entre ambos procesos. La primera es que ambos productos obtenidos durante la fotosíntesis son utilizados por la planta para realizar el proceso de respiración celular. A este respecto habría que resaltar que el oxígeno que la planta obtiene como producto del proceso fotosintético es expulsado como desecho metabólico celular por los estomas de la planta; a diferencia de la glucosa obtenida por este proceso, que es transportada a todas las células para cubrir sus necesidades nutricionales, entre las que se encuentra la obtención de energía, tan necesaria para regular tantísimos procesos celulares. Dicho de otra manera, la glucosa que se utiliza en el proceso catabólico de la respiración en una célula cualquiera de la planta es la misma molécula que esa misma planta ha fabricado anteriormente mediante la fotosíntesis en los tejidos fotosintéticos; pero el oxígeno necesario para este proceso lo toma del medio, no lo ha transportado desde las zonas fotosintéticas hasta aquella célula que está respirando. Es cierto que ese oxígeno fue producido por algún ser fotosintético (o, en menor medida, por fotodisociación del vapor de agua atmosférico), pero puede ser otra planta, alguna bacteria o algún alga; pero es fundamental ser consciente de que lo toma del medio en las cantidades en que lo necesita para llevar a cabo la respiración celular. Bajo este punto de vista sería más correcto el siguiente esquema:



La otra idea que puede llevar a error es que, visto de esta manera, parece que toda la glucosa que la planta sintetiza gracias a la fotosíntesis, la utiliza

posteriormente para degradarla de nuevo en los mismos compuestos que utilizó para formarla y obtener la energía. No olvidemos que la planta tiene la capacidad de transformar la energía lumínica en energía química en forma de ATP en aquellos tejidos con cloroplastos. De esta manera, los tejidos fotosintéticos obtienen la energía química transformando directamente aquella proveniente del Sol. ¿Cuál sería, entonces, la finalidad de fotosíntesis si toda la glucosa que fabrica gracias a ese ATP sirviera, exclusivamente, para obtener, de nuevo, esa energía, restaurando como productos los compuestos utilizados en su fabricación? Bajo este punto de vista, la Naturaleza utilizaría la fotosíntesis exclusivamente como productor de un vehículo de transporte para la energía que necesita la planta en células que no tienen cloroplastos o acceso a la energía lumínica a partir de la cual podrían obtener directamente el ATP que necesitaran. De esta manera, la planta fabricaría la glucosa como una molécula portadora de la energía obtenida, ya que no habría encontrado otra manera de transportarla a las partes sin acceso a la luz solar.

En realidad esto no es así. La mayor parte de la glucosa que la planta sintetiza gracias al proceso fotosintético es utilizada por la planta para generar estructuras y crecer. Esta visión se podría expresar con el siguiente esquema:



En realidad, los nutrientes son utilizados para obtener energía, generar estructuras, ya sea crecer o reparar, y para regular procesos. Pero como solo

estábamos teniendo en cuenta a la glucosa como nutriente orgánico producido mediante la fotosíntesis, este último destino no era una opción.

Esta pregunta presume de ser muy básica y elemental para licenciados en cualquier carrera asociada a las ciencias de la naturaleza (ya sea en biología, medioambientales o geología). Se ha añadido porque siendo uno de los preconceptos más característico según la bibliografía, era importante asegurar que no se encontraba presente en los futuros profesores de biología de Secundaria.

12. ¿Qué significa que las plantas tengan nutrición autótrofa?

- A. Que no tienen los mismos requerimientos nutricionales que los animales.**
- B. Que no necesitan los nutrientes orgánicos para crecer y desarrollarse, sólo necesitan nutrientes inorgánicos.**
- C. A y B son incorrectas.**
- D. A y B son correctas.**

De nuevo, ambas son falsas. Las razones ya han sido expuestas en las preguntas anteriores. Para el mantenimiento de las funciones básicas y su homeostasis el organismo debe nutrirse. Con esos nutrientes crece o repara estructuras, obtiene energía y regula los procesos celulares y el metabolismo. Los nutrientes orgánicos son los mismos para todos los seres vivos: glúcidos, lípidos, proteínas y vitaminas según una clasificación clásica sobre la alimentación y las dietas, aunque más correcto sería hablar de glúcidos monosacáridos, lípidos, aminoácidos y nucleótidos, pero ahora mismo, para el tema que se está tratando en este estudio, esta clasificación no tiene mayor importancia. Con estas moléculas, los seres vivos pueden mantener el funcionamiento celular y reproducirse. La única diferencia es que los animales toman estos nutrientes orgánicos a partir de los alimentos desde el exterior y las plantas pueden fabricarlos gracias al proceso de fotosíntesis.

13. ¿Cuál es el destino de la savia bruta?

- A. Las hojas**
- B. Las raíces**
- C. Todas las células**

La savia bruta está formada del agua y las sales minerales que las plantas absorben por las raíces. Tanto el agua como las sales minerales son nutrientes inorgánicos básicos y necesarios para el buen funcionamiento de las células. Las bombas que participan en el transporte a través de las membranas celulares, por ejemplo, utilizan iones procedentes de las sales minerales como el sodio (Na^+) y el potasio (K^+). Y el agua, por su parte, participa de muchísimas actividades celulares y dentro de los organismos como el mantenimiento de los tampones y de la presión osmótica óptima para muchos procesos celulares como el intercambio de sustancias con el medio. Por lo tanto todas las células requieren de estos nutrientes inorgánicos para su correcto funcionamiento. El agua y las sales minerales que contiene la savia bruta serán absorbidos por todas las células de la planta según sus necesidades, que en el caso de las células fotosintéticas son muy altas, ya que, en estas células, estos nutrientes inorgánicos, son especialmente requeridos para transformarlos en nutrientes orgánicos gracias a la fotosíntesis. Sin embargo, no podemos olvidar que son necesarios en todas las células, aunque sea en menores cantidades, al igual que nuestras células también necesitan ciertos iones y, por supuesto, agua.

14. ¿Cuál es el destino de la savia elaborada?

- A. Las hojas**
- B. Las raíces**
- C. Todas las células**

De nuevo, al igual que ocurre con la pregunta anterior, es fundamental comprender que todas las células necesitan los nutrientes orgánicos que viajan en la savia elaborada.

4. Resultados y discusión

En este capítulo se procederá a mostrar los resultados de los análisis realizados en los manuales universitarios y de los cuestionarios pasados a los estudiantes del Máster de Formación del Profesorado de ESO y Bachillerato de Biología y Geología que estudiaron el Máster desde el curso 2011-12 hasta 2016-17 en la Universidad Complutense de Madrid.

A través de ambos análisis se pretende responder a las preguntas planteadas en esta investigación y reflexionar acerca de la situación actual y las posibilidades reales de que mejore la enseñanza y el aprendizaje de la nutrición vegetal. Se entendería como mejoría a la disminución de las ideas erróneas y alternativas que poseen los estudiantes sobre estos contenidos.

4.1 ANÁLISIS DEL CONTENIDO SOBRE NUTRICIÓN VEGETAL Y FOTOSÍNTESIS EN LOS MANUALES UNIVERSITARIOS

Para hacer el estudio en profundidad de los manuales de fisiología vegetal hemos escogido cinco de los manuales más utilizados en el estudio de esta materia en la Universidad Complutense de Madrid:

1. Guardiola Bárcena, (1990). Fisiología Vegetal I: Nutrición y transporte.
2. Barceló Coll, (2003). Fisiología Vegetal.
3. Strasburger, (2003). Tratado de botánica.
4. Lincoln Taiz, (2006). Plant physiology.
5. Azcón-Bieto, (2008). Fundamentos de Fisiología vegetal.

Para simplificar el texto y que resulte más sencillo de entender, aludiremos a estos manuales como Libro 1, 2, 3, 4 y 5, numerándolos desde el más antiguo al más moderno según su fecha de publicación y por orden alfabético como segundo criterio, tal y como aparecen ordenados arriba.

Puesto que el objetivo es ofrecer un análisis representativo y significativo de los recursos que poseen los estudiantes universitarios y cualquiera que desee buscar respuestas en las fuentes que se suponen más fiables, se han escogido estos manuales. Hay muchos libros de texto para los niveles de Primaria y Secundaria, pero en el caso particular de los manuales especializados, lo cierto es que, por norma general, aunque haya muchos, en realidad son muy pocos de cada disciplina los que pueden considerarse referencia para todos los estudiantes y personas especializadas. Por ello, como ya se ha expuesto, aunque el Strasburger no es un texto exclusivamente dedicado a la fisiología vegetal, sino que es un tratado de botánica, puede considerarse, sin ninguna duda, el texto de referencia para cualquier tema relacionado con las plantas. Además, incluye un bloque entero, de tres que tiene en total, sobre fisiología vegetal y se presentan estos contenidos con la misma profundidad y rigurosidad que los manuales que se centran en la Fisiología vegetal de forma exclusiva.

Como ya se ha expuesto anteriormente, es importante remarcar que los manuales de fisiología vegetal son textos mucho más especializados, dirigidos a estudiantes de niveles superiores, a investigadores o a profesionales de algún tipo, por lo que no incluyen conceptos básicos como el de *nutrición autótrofa*, ni ofrecen una visión sobre el proceso general de la nutrición vegetal, ni sobre su *role* en el reciclado de la materia y los flujos de energía a nivel planetario. Es por este motivo que no ha sido posible analizar las mismas cuestiones que hemos estudiado con los cuestionarios, con los que lo que se pretende es analizar la situación académica del concepto general de nutrición vegetal y el papel que juegan los seres autótrofos, en particular las plantas, en el flujo de materia y energía del planeta. Ni siquiera los cuestionarios utilizados para los estudiantes del Máster de Formación del Profesorado, futuros profesores de Secundaria y licenciados o graduados en alguna carrera de ciencias de la naturaleza, normalmente biología, tienen la profundidad de estos textos. Precisamente, una de las características más importantes de estos cuestionarios era que no requirieran conocimientos profundos o muy

especializados; que no fuera necesario que los estudiantes recordaran bien los detalles de los procesos fisiológicos, sino que tuvieran claro el concepto a nivel genérico, que lo entendieran desde un punto de vista general y global, sin necesidad de que recordaran los detalles. Es a causa de esto que no se puede marcar un paralelismo claro en la estructura del análisis de los manuales universitarios y de los cuestionarios. Mientras que los cuestionarios analizan cuestiones básicas sobre la nutrición vegetal en general, con el análisis de los manuales universitarios hemos analizado los contenidos que se refieren al proceso de fotosíntesis en particular.

Por este motivo, y para que resulte más sencillo de comprender y de seguir, se ofrece un breve análisis de cada manual acerca del tratamiento que hace sobre la fotosíntesis y, posteriormente, se pasará a hacer el análisis comparativo de los textos a partir de 5 cuestiones.

4.1.1. Breve análisis del contenido de cada uno de los manuales

Libro 1: Guardiola Bárcena (1990)

A pesar de tener bastantes años, este libro sigue siendo un referente para el estudio de la fisiología vegetal. Es cierto que ya no es la primera opción normalmente pero sigue teniendo su importancia porque es muy manejable, hay muchas copias en la biblioteca de la Facultad de biología de la UCM y tiene otros libros de la misma serie con los problemas y ejercicios que se trabajan en la asignatura de fisiología vegetal en la carrera de biología.

- Índice:

El tema de la fotosíntesis se trata en una unidad entera (la unidad 4) de ocho en los que se divide y organiza el libro y abarca desde la página 125 hasta la 199. Esta unidad se encuentra dividida en seis puntos:

4.1. Introducción	p.125
4.2. El cloroplasto	p.126
4.3. Captación de energía luminosa y síntesis de ATP y NADPH....	p.143
4.4. Metabolismo del carbono en la fotosíntesis	p.150
4.5. Otros procesos energizados por la luz	p.183
4.6. Factores que afectan a la fotosíntesis	p.186

Podemos observar cómo divide el proceso de fotosíntesis en dos fases que muestra en dos epígrafes diferentes, uno que denomina “Captación de energía luminosa y síntesis de ATP y NADPH” y otro donde explica la fijación del carbono que llama “Metabolismo del carbono en la fotosíntesis”. Aquí se comprueba que, sin necesidad de explicar conceptos básicos como la división de la fotosíntesis en dos fases, una dependiente de luz, puramente fotosintética, donde se transforma la energía lumínica proveniente del Sol en energía química en forma de moléculas de ATP y poder reductor, y otra fase puramente metabólica en la que se reducen los compuestos orgánicos, el CO₂ en este caso, gracias al ATP y al NADH obtenido en la fase anterior, da por hecho esta idea y muestra en su esquema esta división.

Lo que resulta de gran interés es que muestra una clara separación entre el metabolismo del carbono como proceso fotosintético y los procesos de fotosíntesis del nitrógeno y del azufre que trata en el segundo epígrafe dentro del punto 5 de este mismo tema (“Otros procesos energizados por la luz”), considerándolos procesos relacionados con la luz pero separándolos de la fotosíntesis como tal. De esta manera deja claro que el único

componente que se obtiene mediante la fotosíntesis son los azúcares y olvidando, de esta manera, que aunque más del 90% del peso seco de la planta sean azúcares, las plantas necesitan fabricar otros compuestos orgánicos para vivir y que las rutas de síntesis de estos compuestos utilizan el mismo ATP y el mismo NADH obtenido durante la fase dependiente de luz de la fotosíntesis, al igual que la síntesis de azúcares.

Además, para explicar la reducción de los nitratos y sulfatos, este libro dedica menos de una página y media a los dos juntos, lo cual indica el grado de desarrollo que reciben estos dos procesos a pesar de ser tan básicos y necesarios para el mantenimiento de la planta, pues son imprescindibles para la síntesis de proteínas, por ejemplo.

- Introducción:

En la página 125 encontramos una breve introducción al tema de la fotosíntesis que se titula “La fotosíntesis como proceso endergónico”. Así comienza este texto:

“Las plantas, como los animales, obtienen la energía necesaria para los procesos metabólicos fundamentalmente mediante la oxidación de los azúcares, proceso exergónico que, como tal, libera energía.

El proceso contrario, la síntesis de azúcares a partir de CO₂, requiere por tanto un aporte de energía: la luz en los organismos fotosintéticos”

Podríamos considerar que lo llama “proceso contrario” por el hecho de que uno es la “degradación” de azúcares y el otro la “síntesis” de azúcares, pero en cualquier caso no parece muy acertado ya que lleva a ideas erróneas sobre ambos procesos. Trata a uno como proceso exergónico y al otro como su contrario, endergónico, dando a entender que uno “deshace”

lo que el otro “hace”, cuando ambos procesos forman parte de la nutrición de las plantas como dos fases de la misma, no como procesos contrarios. Esta interpretación de la respiración celular y de la fotosíntesis como procesos contrarios está demostrado que conlleva a importantes errores conceptuales sobre este tema (Cañal, 2005).

A partir de aquí, divide la fotosíntesis en dos grandes grupos de reacciones: Las que convierten la energía luminosa en ATP y poder reductor, y las que convierten el CO₂ en carbohidratos.

- Asimilación de nitratos y sulfatos:

Como ya se ha dicho, la asimilación de los nitratos y los sulfatos los trata dentro del punto 5 que denomina “Otros procesos energizados por la luz”, que va desde la página 183 a la página 185. Dentro de este punto, estos dos procesos se tratan en menos de una página y media entre los dos y reciben un trato claramente secundario considerándolos procesos relacionados con la luz pero dejándolos fuera de la fotosíntesis.

Sin embargo, es curioso que en la página 185 se pueda leer el siguiente párrafo:

“La reducción de los nitritos y su incorporación a glutamato tiene lugar en el estroma de los cloroplastos utilizando los equivalentes de reducción y el ATP generados por la luz.”

Más adelante, en la misma página, añade lo siguiente, refiriéndose a la reducción del sulfato:

“Estos procesos, junto a la fotorrespiración, muestran una función central del proceso fotosintético en el metabolismo de los aminoácidos en la planta”.

Con estas dos frases, el texto da a entender que la asimilación de los nitratos y sulfatos son parte del proceso fotosintético y afirma sin dejar lugar a dudas, que son los mismos compuestos generados durante la fase dependiente de luz de la fotosíntesis los que se utilizan en la reducción de los compuestos de azufre y nitrógeno para generar los aminoácidos necesarios para la síntesis de las proteínas.

Así pues, el problema parece ser el tratamiento desigual que se hace de estos procesos respecto al de síntesis de azúcares o fijación de carbono, al considerarlos procesos minoritarios o menos relevantes, de forma que, a pesar de admitir su relación directa con el proceso, se decide dejarles fuera a la hora de explicar la fotosíntesis como tal. En este libro observamos la separación del proceso de síntesis de ATP y poder reductor mediante las reacciones fotoquímicas mediadas por la luz y el metabolismo del carbono que necesita de esa energía química y poder reductor para formar compuestos orgánicos a partir del CO_2 inorgánico. Es cierto que utiliza los productos de esa fase fotoquímica de síntesis (ATP y NADPH), pero este proceso es puramente metabólico, siendo estos los sustratos enzimáticos aquí como en los otros procesos. Ante esta separación del proceso de fotosíntesis en uno puramente “fotosintético” y otro metabólico, no encontramos razón ninguna para el tratamiento desigual entre el metabolismo de reducción del CO_2 y el de reducción de los nitratos y sulfatos que utiliza ese mismo ATP y poder reductor para producir compuestos orgánicos.

Libro 2: Barceló Coll (2003)

Este libro puede considerarse como uno de los mayores referentes bibliográficos para consultar y trabajar la asignatura de fisiología vegetal. Como vamos a ver, el proceso de la fotosíntesis ya no lo expone en un solo tema sino en varios que ordena de forma consecutiva.

- Índice:

Al igual que en el caso anterior, lo primero que observamos es el índice. El libro se divide en siete partes; algunas de ellas, como la “Parte quinta”, que corresponde a la Respiración, consta de un solo tema, mientras que otras, como la que nos interesa, denominada “Parte cuarta”, constan de varios temas. Esta “Parte cuarta” se titula “Fotosíntesis y procesos relacionados”.

PARTE CUARTA

Fotosíntesis y procesos relacionados

Tema 9: Fotosíntesis. Generalidades	p.141
Tema 10: Cloroplastos	p.153
Tema 11: Pigmentos fotosintéticos	p.165
Tema 12: Absorción de la luz y transporte electrónico fotosintético	p.177
Tema 13: Fotofosforilación	p.193
Tema 14: Asimilación del CO ₂ . Ciclo de Calvin.....	p.203
Tema 15: Otras vías de fijación y asimilación fotosintética del CO ₂	p.215
Tema 16: Fotorrespiración	p.227
Tema 17: Factores que regulan la fotosíntesis y rendimiento fotosintético	p.237
Tema 18: Reducción asimilatoria del nitrógeno	p.251
Tema 19: Reducción asimilatoria del sulfato	p.265

Este libro incluye la asimilación del sulfato y del nitrato dentro del mismo bloque en el que explica la fotosíntesis (“Parte cuarta”). Sin embargo, este bloque se titula “Fotosíntesis y procesos relacionados” y da la sensación que hasta el tema 17 (“Factores que regulan la fotosíntesis y rendimiento fotosintético”), los capítulos explican diferentes conceptos sobre la fotosíntesis, mientras que los dos últimos, los capítulos 18 y 19 (“Reducción asimilatoria del nitrógeno” y “Reducción asimilatoria del sulfato” respectivamente) los saca fuera del propio proceso de la fotosíntesis considerándolos “procesos relacionados”. De esta manera, este manual, de nuevo, considera a la fotosíntesis como un proceso dirigido a la síntesis de carbohidratos en vez de a la producción de la materia orgánica que la planta necesita. Incluye dentro de la fotosíntesis, incluso, un tema que titula “Fotorrespiración”, que es un proceso que ocurre cuando las concentraciones de O_2 son tan altas que la enzima RuBisCO pierde afinidad por el CO_2 y se une al O_2 , paralizando así el proceso fotosintético y malgastando, hasta lo que ahora se sabe, la energía lumínica y la maquinaria fotosintética, al no fijar el CO_2 .

- Introducción a la fotosíntesis

El tema 9 del libro, primer tema dentro de la Parte cuarta, se titula “Fotosíntesis. Generalidades” y se plantea como un tema introductorio con aquellos conceptos necesarios para la comprensión del proceso fotosintético en su conjunto y aquellos que se necesitan para la comprensión de los temas siguientes. Sin embargo, a pesar esto, no ofrece conceptos básicos como el de *nutrición autótrofa* o *flujos de materia y energía*; comprobando, una vez más, que estos conceptos se consideran demasiado básicos para este tipo de manuales especializados, ya que deben estar totalmente dominados por los usuarios de estos textos. A pesar de ello, en la página 141, el libro incluye una introducción del tema 9 y expone lo siguiente:

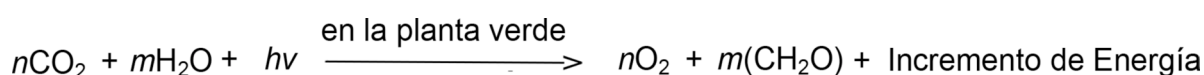
“En esencia (hablando de la fotosíntesis) consiste en la liberación del oxígeno integrante de la molécula del agua y el almacenamiento del poder reductor resultante en numerosos compuestos carbonados que constituyen la materia viva.”

Leyendo esta frase parece que no solo se refiere a los azúcares en esta introducción. Además el siguiente párrafo continúa así:

“Es un proceso de oxidorreducción en que un donador de electrones, el agua, se oxida y un aceptor, el anhídrido carbónico u otro aceptor adecuado, como puede ser el nitrato o sulfato, se reduce.”

Con esta frase deja clarísimo que considera a los procesos de asimilación de nitrato y sulfato como procesos fotosintéticos. Resulta curioso que esta introducción asuma sin problemas que la reducción de sulfatos y nitratos formen parte de la fotosíntesis, pero que no se mantenga el mismo discurso en los temas posteriores. ¿Por qué esa idea tan sencilla e integradora no se refleja con normalidad en el índice?

Además, observamos que después de describir al proceso fotosintético de esta manera, en el punto inmediatamente posterior, donde hace un breve desarrollo histórico del descubrimiento de la fotosíntesis, termina a mediados del siglo IXX con el esquema típico de la fotosíntesis (página 142):



Y concluye de la siguiente manera:

“El hecho de que la fotosíntesis lleva a la formación de hidratos de carbono fue demostrado por Sachs, quien expuso la mitad de una hoja a la luz,

dejando la otra mitad a oscuras. Al cabo de cierto tiempo sometía toda la hoja a los vapores del yodo, observando que la mitad iluminada tomaba color violeta oscuro, debido a la reacción del almidón con el yodo.”

De esta manera da a entender que mediante la fotosíntesis el producto que se forma son los hidratos de carbono. ¿Qué debe entender un estudiante cuando lee dos ideas diferentes en dos páginas consecutivas de un mismo libro?

Parece una norma general en estos manuales el quedarse en el siglo XIX cuando hacen una revisión histórica. Parece como si el siglo XX no hubiera aportado ningún dato o ninguna investigación relevante a esta cuestión. Así se dejan fuera, incluso, las investigaciones de Calvin que fueron en la década 1950, al que después van a considerar como el descubridor del ciclo central y más importante del proceso fotosintético: el Ciclo de Calvin. Es cierto que si se quedan aquí, si consideran que a mediados del siglo XIX ya sabían todo lo reseñable del proceso de fotosíntesis, se dejarán fuera todo el tema de la síntesis de todos los demás compuestos orgánicos que la planta necesita, pues esta idea se tuvo en consideración a partir de los años 50, con los descubrimientos del mismísimo Calvin.

- División del proceso fotosintético en dos fases

El tema 9 continúa exponiendo conocimientos y datos sobre la fotosíntesis para ir generando una base sobre la que después explicar el proceso. Cuenta los valores de la fotosíntesis medidos en relación a la concentración de CO₂, por supuesto; las vías de difusión del CO₂; su flujo durante la fotosíntesis midiendo su resistencia tanto en las hojas, como en el mesófilo, como en el cloroplasto; la relación entre la transpiración y la fotosíntesis; etc. Mientras que el tema 10 explica la estructura y la genética

de los cloroplastos en profundidad y el 11 desarrolla todo lo relacionado con los pigmentos fotosintéticos.

Sin embargo en el tema 12, que se titula “Absorción de la luz y transporte electrónico fotosintético”, encontramos algo interesante en el contexto de los preconceptos en los estudiantes. En la página 177 aparece una introducción del tema que remarca el uso incorrecto de los términos *fase oscura* y *fase lumínica* que tantos problemas provoca en la comprensión del proceso fotosintético:

“En los experimentos de Blackman se concluía que en la fotosíntesis actúan dos procesos: uno oscuro (dependiente de la concentración de CO₂) y luminoso. (...). Experimentos posteriores han confirmado la utilidad de la separación conceptual de ambos procesos, oscuro y luminoso.”

La explicación continúa con un pequeño resumen de un experimento con el ¹⁴CO₂ para mostrar que en la llamada *fase lumínica* se deben fabricar ciertos compuestos necesarios para convertir el CO₂ en azúcares en la *fase oscura*. Y después continúa:

“Los términos operacionales de fases oscura y luminosa no deben inducir a confusión; en la naturaleza ambas fases se producen en la luz pero, experimental y transitoriamente, una de ellas se puede realizar en la oscuridad.”

Como ya se ha expuesto anteriormente, los estudios confirman los problemas que conlleva la utilización de estos términos en el aula y en los libros. El libro, como muchos otros, defiende la ventaja de separar el proceso fotosintético en estas dos etapas aunque advierte del posible error al que puede llevar. Por mucho que después se remarque que solo es una manera de llamarlos, que no implica que la segunda fase se de en oscuridad, sino solo que es un proceso no dependiente de luz y que no

significa que la segunda se da por la noche en la naturaleza, la fuerza de esos dos términos puede llevar a los estudiantes a error. Los estudiantes extraen de estos textos las ideas clave para prepararse las asignaturas. De este texto extraerán los “nombres” de las fases y lo que ocurre en cada una. En nuestra opinión, en vez de usar esos términos y tener que remarcar una y mil veces que se ponga atención para no entenderlos mal, ¿por qué no llamarlos de otra manera? La respuesta es: por tradición. Sin embargo, una vez descubierto el verdadero mecanismo de la fotosíntesis y haber estudiado todos los problemas que ocasiona esta terminología en los estudiantes, creemos que va siendo hora de erradicar estos nombres y cambiarlos por otros. Nosotros proponemos los términos *fase dependiente de luz* o *fase fotoquímica* para la conocida *fase lumínica*; y *fase metabólica* o *independiente de luz* para la *fase oscura*.

- Una nueva definición para la fotosíntesis: una nueva contradicción

Después de la introducción donde expone los términos *fase lumínica* y *fase oscura*, en este tema 12 explica todo lo referente a la excitación de los pigmentos fotosintéticos por la luz y los transportadores de electrones en términos de física de la luz. Sin embargo, en la misma página 177, antes de meterse en materia seria, vuelve a dar otra vez una definición del proceso de la fotosíntesis, al igual que hizo en la introducción del tema 9.

“El proceso fotosintético en plantas consiste básicamente en una óxido-reducción. En la que electrones del agua pasan al carbono del CO₂ en una reacción ayudada por la luz.”

Observamos cómo ha cambiado la definición dentro del mismo libro; al principio del tema 9, define a la fotosíntesis como un proceso más completo cuya finalidad es sintetizar otros componentes orgánicos que la planta necesita a partir de los nutrientes inorgánicos que la planta incorpora del

medio, no solo azúcares. En el tema 12, esta visión desaparece por completo en la definición general del proceso y no aparece más hasta los temas 18 y 19 (“Reducción asimilatoria del nitrógeno” y “Reducción asimilatoria del azufre”, respectivamente) que son tratados como procesos “complementarios” a la fotosíntesis.

Posteriormente, en el tema 13 (“Fotofosforilación”) se explica la síntesis de los compuestos necesarios para la posterior asimilación de los nutrientes inorgánicos; la formación de ATP y poder reductor. Sin embargo, solo contempla la finalidad de usar estos compuestos para asimilación del CO₂ y la consiguiente síntesis de carbohidratos, olvidando por completo esos compuestos de nitrógeno y azufre de que hablaba en la primera definición que ofrecía en la introducción del tema 9 y, con ello, la síntesis de los aminoácidos, por ejemplo.

El tema 14 se denomina “Asimilación del CO₂. Ciclo de Calvin” y trata por completo sobre la ruta de asimilación más común, propia de las plantas C-3. El ciclo fotosintético de reducción del CO₂ (CFRC) se conoce comúnmente como ciclo de Calvin en honor a sus descubridores Calvin, Benson y Bassham en la década de 1950 (Bassham *et al.*, 1950; Azón-Bieto, 2003; Barceló, 2003) y se ha convertido en la ruta que se considera “central” del proceso fotosintético ya que es a partir de ella que se forman las triosas-P con las que finalmente se obtiene la glucosa y el almidón. Pero no deja de resultar curioso que, como ya se ha dicho anteriormente, en los experimentos que llevaron a deducir el CFRC aparecieran muchos aminoácidos como productos sintetizados (Stepka *et al.*, 1948) y que estos productos nunca hayan ganado el suficiente protagonismo ya que el nitrógeno, por ejemplo, es un elemento esencial para las plantas, que necesitan en grandes cantidades para llevar a cabo multitud de procesos. El nitrógeno es utilizado para la formación de aminoácidos esenciales para formar proteínas y enzimas que darán lugar a una gran cantidad de procesos esenciales para la vida vegetal (Friedman, 2004).

- Reducción asimilatoria del nitrógeno y del azufre

Los temas 14 y 15 explican las rutas de asimilación del CO_2 , que sin duda aporta el bioelemento más importante para realizar los esqueletos carbonados de todas las biomoléculas orgánicas. Una vez explicada la manera en la que se incorpora el carbono gracias a la fotosíntesis habría que contar la asimilación del resto de bioelementos necesarios para la síntesis del resto de las biomoléculas. Esta sería la única manera de ofrecer una idea completa de la fotosíntesis, de su objetivo y papel para el planeta como proceso productor de materia orgánica y que introduce la energía en los ecosistemas. Habría pues que colocar a continuación los temas que hacen referencia a la reducción asimilatoria del nitrógeno y del azufre.

Sin embargo, el tema 17 se dedica a explicar los factores que regulan la fotosíntesis y el rendimiento fotosintético, dando así por terminado y explicado completamente el proceso de la fotosíntesis. En este tema explica como ciertos factores como la intensidad de luz, la temperatura, la concentración de CO_2 , de O_2 y de agua afectan al rendimiento fotosintético, pero lo referencia siempre con la tasa de fijación del CO_2 .

Pero lo que resulta curioso es la elección de colocar un tema que hace referencia a la fotorrespiración antes de dar por acabada la fotosíntesis, en el tema 16, que es un proceso que disminuye la tasa fotosintética en condiciones de alta concentración de O_2 porque la enzima RuBisCO también puede usarlo como sustrato, de manera que deja de usar CO_2 y empieza a utilizar O_2 , invirtiendo el intercambio gaseoso. Dicho de otra manera, consumiendo O_2 y expulsando CO_2 en plantas C-3. La fotorrespiración es un proceso que puede tener su importancia en situaciones especiales donde la concentración del O_2 en el ambiente es superior a la atmosférica normal (21%) y lo que provoca es una disminución de la tasa de fotosíntesis.

Como ya se ha comentado, los últimos dos temas de este bloque, el 18 y el 19, explican las fijaciones y asimilaciones del nitrógeno y del azufre, respectivamente. Estos procesos son considerados como “procesos relacionados con la fotosíntesis”, no como parte de ella.

Entendemos la asimilación del nitrógeno como la reducción de moléculas de nitrógeno y la consecuente formación de moléculas orgánicas nitrogenadas. Y entendemos la asimilación del azufre como la reducción de moléculas de azufre y la consecuente formación de moléculas orgánicas con grupos de azufre reducido como los sulfuros o los tioles. Estas reducciones desde grupos de nitrógeno o azufre muy oxidados, (como los nitratos o sulfatos) requieren de unos intermediarios que se obtienen en las reacciones de la fase fotoquímica de la fotosíntesis, a través del transporte electrónico fotosintético: el ATP y el poder reductor. También requieren de unas moléculas orgánicas (compuestas por esqueletos de carbono) a las que unirse cuando los compuestos de nitrógeno o azufre son reducidos. Esto es exactamente lo mismo que ocurre con la asimilación del carbono; el CO₂ introducido requiere del ATP y del poder reductor sintetizados en la fase fotoquímica de la fotosíntesis para introducirse en una molécula orgánica preexistente, la ribulosa-1,5-difosfato (RuDP) en este caso.

En este libro, se desarrolla el tema 18 entero para este proceso de incorporación de nitrógeno inorgánico y formación de moléculas orgánicas con nitrógeno al que llama “Reducción asimilatoria del nitrógeno”, y el tema 19 para explicar el caso del azufre (“Reducción asimilatoria del azufre). Como ya se ha dicho, al incluirlo dentro del bloque dedicado a la fotosíntesis, da a entender que existe una relación directa con ella, pero al colocar los dos últimos temas de un bloque que titula “Fotosíntesis y procesos relacionados”, lo que da a entender es que ambos son a lo que se refiere como “procesos relacionados”; de manera que no forman parte del proceso fotosintético en sí aunque estén relacionados.

En la introducción de este tema 18, en la página 251, encontramos la única frase de todo el tema que relaciona este proceso con el de la fotosíntesis:

“A su vez, el NO_3^- del suelo pasa a ser la fuente principal de nutrición del N para las plantas en donde, en gran parte, experimenta un proceso de reducción asimilatoria de NO_3^- a NH_4^+ , que está ligada fundamentalmente al proceso fotosintético.”

Y añade para terminar esta introducción en la misma página 251:

“Veremos que, junto con el C, el N forma parte central del metabolismo de la planta y muestra una participación directa del sistema plastidial y de la maquinaria fotosintética (autotrofía del N).”

En la primera frase encontramos la idea de que este proceso está ligado al de la fotosíntesis, por lo tanto, no forma parte de él, sino que están relacionados. Sin embargo, en la segunda frase encontramos la expresión “autotrofía del N”. Con este concepto se acepta que la planta es capaz de convertir los compuestos de nitrógeno inorgánicos en orgánicos y para ello le hace falta una fuente de energía. Esta fuente energética, curiosamente, es la misma que la que se usa para la fijación del CO_2 . ¿Qué motivo hay para insistir tanto en sacar este proceso, entre otros, del fotosintético? Ya se dijo en la primera definición que se dio sobre la fotosíntesis en la página 141 del tema 9 que el aceptor final de electrones que se reduce puede ser el CO_2 , el nitrato o el sulfato. Ahora, en cambio, esta reducción del nitrato es tratada como un proceso separado de la fotosíntesis pero relacionado de alguna manera.

Estas frases que relacionan la asimilación del nitrógeno y la fotosíntesis se encuentran en medio de la explicación del ciclo del nitrógeno general tratado en términos ecológicos más que fisiológicos o metabólicos. Dicho de otra manera, la referencia a la relación entre la asimilación del nitrógeno

y la fotosíntesis se encuentra en una introducción de carácter muy general lo que provocará, una vez más, que los estudiantes que se lean esta parte del texto la considerarán una introducción que no aporta más que una idea global. En la parte en la que se profundiza y se exponen los mecanismos fisiológicos y las reacciones metabólicas que explican realmente la manera en la que se produce esta asimilación no se une el proceso con la fotosíntesis.

Además, el libro utiliza la mitad del tema (desde la página 251 hasta la página 257) para explicar la fijación del N_2 atmosférico mediante la simbiosis con bacterias, cuando este proceso es exclusivo de ciertas especies (en especial las leguminosas) mientras que la asimilación reductiva del nitrógeno inorgánico y la formación de aminoácidos y ácidos nucleicos es un proceso necesario para todas las plantas puesto que todas fabrican y necesitan proteínas y enzimas para su funcionamiento normal. La fijación del N_2 es un proceso bacteriano necesario para introducir el nitrógeno en el suelo en forma de nitrato, que es la forma asimilable por las plantas. Por lo tanto, aunque es cierto que puede resultar interesante contarle, ya que el nitrógeno se comporta como factor limitante en el crecimiento de las plantas, ya que a pesar de existir en la atmósfera en grandes cantidades las plantas no tienen acceso a él, no sería un proceso que forme parte de la nutrición vegetal. Solo sería una explicación sobre cómo los nitratos (formas de nitrógeno que absorben las plantas por las raíces) llegan al suelo dentro del ciclo biogeoquímico del nitrógeno.

En la página 257 se explica que el proceso de absorción de nitrógeno por las raíces en forma de nitrato, su reducción hasta el nivel de NH_4^+ y su incorporación en la materia orgánica, es un proceso autótrofo que las plantas utilizan para sintetizar los diferentes compuestos orgánicos que contienen nitrógeno (aminoácidos, ácidos nucleicos, alcaloides, etc.); reconociendo, una vez más, su carácter autótrofo, con las implicaciones que tiene el uso de este término. También explica que la reducción de los

nitratos y su posterior asimilación en materia orgánica tiene altos costes energéticos (de ATP y poder reductor) y que este proceso puede tener lugar en la raíz, donde se absorben los nitratos, pero que mayoritariamente ocurre en las hojas mediante el proceso fotosintético (página 258):

“(...) transporte mayoritario, como tal nitrato, por el xilema hacia los órganos superiores, prioritariamente las hojas donde ocurre el proceso de reducción y asimilación fotosintética de los nitratos.”

Y continúa un poco más adelante:

“La luz favorece el proceso de reducción y asimilación, mientras que la oscuridad mantiene niveles vacuolares de reserva de nitratos.”

Más adelante, en la página 259 explica la reducción de nitrito a amonio en los plastidios (normalmente cloroplastos) y expone:

“Normalmente en la planta el enzima (hablando de la nitrito reductasa) utiliza el poder reductor de la ferredoxina fotosintética, más raramente NADPH.”

No olvidemos que la *ferredoxina* es una proteína extrínseca de membrana que pertenece al fotosistema I y su principal función dentro de la cadena de transporte de electrones fotosintética consiste en conectar el fotosistema I con la enzima final que reduce el NADP^+ . Dicho de otra manera, esta proteína transfiere los electrones cedidos por la ruptura de la molécula de agua y excitados por la luz en las membranas tilacoidales de los cloroplastos para la formación del NADPH. En nuestra opinión, en el momento en el que la ferredoxina reducida cede los electrones para la reducción del nitrito a amonio, podríamos decir que este proceso está algo más que *relacionado* con el proceso fotosintético. Utiliza los electrones donados por la hidrólisis del agua, utiliza la energía lumínica para excitarlos

y poner en marcha la cadena de transporte de electrones fotosintética y la ferredoxina, proteína del fotosistema I, como donadora de electrones. ¿Qué más se necesita para considerar que la reducción de nitratos forma parte del proceso fotosintético?

En el caso de la reducción del azufre, tema 19, las ideas expuestas son aún más vagas que para el nitrógeno. Además de que el tema solo ocupa 7 páginas y media de nuevo incluyendo la explicación del ciclo biogeoquímico del azufre en la introducción, la mitad de lo que se extiende el capítulo 18 con la asimilación del nitrógeno. La explicación a esto es que aún no hay una interpretación única y consensuada a los datos experimentales para la ruta de asimilación del azufre. El libro lo explica así en la página 266:

“Los pasos de reducción del sulfato y sulfito a sulfuro no están tan bien definidos y caracterizados como en el nitrato (capítulo 18.3), (...).

Sin embargo, en la introducción de este tema (página 265) sí remarca la importancia de este proceso a nivel ecosistémico y del reciclado de la materia de una manera explícita:

“Los sistemas animales, si bien pueden activar metabólicamente al sulfato, carecen de los sistemas enzimáticos para su reducción y asimilación a la materia orgánica. De aquí, de nuevo, la importancia fisiológica y ecológica del conocimiento del proceso de reducción asimilatoria del sulfato por las plantas.”

En lo que se refiere a la relación entre la fotosíntesis y la reducción de los sulfatos hay una pequeña referencia en la página 266 que dice:

“En todo caso, el proceso de reducción asimilatoria más intenso (“fuente”) ocurre normalmente en las hojas, ligado directamente a la fotosíntesis.”

En cualquier caso, su relación con el proceso fotosintético vuelve a expresarlo de igual manera que en el tema anterior en la página 267, en la sección en la que desarrolla los pasos bioquímicos de la reducción asimilatoria del sulfato propiamente dicha:

“Hay un fuerte paralelismo y clara conexión entre la reducción asimilatoria del nitrato y del sulfato en las plantas. (...) y se encuentran conectadas directamente con la fotosíntesis y el sistema de los plastidios.”

Esta manera de expresarlo, de nuevo da a entender que son procesos relacionados pero no que la reducción del sulfato forme parte del proceso fotosintético. Y de nuevo vemos esa relación en la que los productos que se generan gracias a la luz y a la hidrólisis del agua en los cloroplastos que son los que se utilizan para la reducción asimilatoria del CO_2 son los mismos que se utilizan en la del sulfato, por lo que no comprendemos el criterio que se sigue para afirmar que uno forma parte de la fotosíntesis y el otro no. Así, al menos, versa el pie de la figura 19.2 de la página 268 del esquema global simplificado de la activación, reducción y asimilación del sulfato en la planta:

“(...). La necesidad energética (ATP) y de poder reductor (Fd_{red} o NADPH) se acopla directamente al proceso fotosintético, pues estas enzimas se localizan en el cloroplasto (...).”

En cualquier caso, es una información que solo aparece en el pie de imagen; en el texto no se explica nada, ni se hace ninguna referencia al respecto. Sin embargo, para terminar el tema, en la página 271 se habla de la localización de este proceso y vuelve a repetir que normalmente ocurre en las hojas y que los procesos de reducción y asimilación están acoplados directamente a la fotosíntesis puesto que la fotosíntesis es la que llena sus necesidades energéticas (ATP) y de poder reductor (Fd_{red} o NADPH). Y que, aunque puede ocurrir en las raíces de manera secundaria, “el sulfato

es transportado mayoritariamente por el xilema a las hojas con mejor beneficio fotosintético.” Con todo lo expresado anteriormente, ¿qué se debe entender de esta frase? Ahora, de pronto, ¿acaba de considerar la reducción del sulfato dentro del proceso fotosintético? No deja de sorprendernos las expresiones vagas e, incluso, contradictorias que encontramos sobre la concepción de estos procesos.

En cualquier caso, cuando se exponen estas ideas extraídas del libro y aisladas del resto de explicaciones puede parecer que el libro deja clara la idea de que la reducción nitratos y sulfatos forma parte del proceso fotosintético, pero no podemos perder la perspectiva de que estas frases son las únicas que el libro ofrece al respecto. Realmente entre todo el resto de explicaciones, las contradicciones y las vaguedades en las que no se sentencia con rotundidad que esto sea así, la idea pasa totalmente desapercibida.

Libro 3: Strasburger (2003)

- Índice:

Como ya se ha expuesto anteriormente, este libro es el tratado de botánica más famoso y utilizado por los estudiantes de cualquier rama del conocimiento vegetal. El libro se divide en 4 partes: la primera trata sobre la estructura de las plantas en todos los sentidos, desde su estructura a nivel molecular pasando por las células, los tejidos, la organización talófitas y llegando a la estructura de las cormófitas; la segunda parte del libro es donde se tratan todas las cuestiones que hacen referencia a la fisiología. En esta parte se tratan todos los temas del metabolismo, el desarrollo, la fisiología del movimiento y aspectos de fisiología comparada que estén relacionados con las plantas, como los heterótrofos, los herbívoros, los patógenos de las plantas, etc. En la tercera parte se tratan los temas de

evolución y sistemática; y en la cuarta parte, los temas relacionados con la ecología.

Lo cierto es que, en el fondo, todos pueden resultar interesantes y están interrelacionados, la parte que trata de forma directa el tema que interesa para esta investigación sería el tema 6 denominado “Fisiología del metabolismo” que se encuentra dentro de la segunda parte del libro. Dentro de este tema encontramos 18 apartados distintos de los cuales nos interesan los siguientes:

6.4. Fotosíntesis: la reacción lumínica.....	p.267
6.5. Fotosíntesis: el camino del carbono	p.288
6.6. La asimilación del nitrato	p.307
6.7. La asimilación del sulfato	p.310

Aunque en este caso los temas quedan muy seguidos de nuevo se observa la diferenciación entre el metabolismo del carbono y el del nitrógeno y el azufre. Además de una clara diferencia en la cantidad de páginas dedicadas a cada tema; la parte que dedica a explicar las reacciones dependientes de luz de la fotosíntesis ocupa 21 páginas y las que utiliza para explicar la asimilación del CO₂ son 19. Sin embargo para explicar la asimilación reduccional del nitrato solo necesita 3 páginas y para la del azufre solo una. A parte, en los apartados siguientes podemos encontrar también uno para la síntesis de aminoácidos, otro para la síntesis de lípidos y otro para las bases nitrogenadas. Pero cuando estudiamos su contenido, no hay ninguna referencia a la posible relación entre la fotosíntesis y la reducción y asimilación de los nitratos y sulfatos tan necesarios para síntesis de todos estos componentes.

- Introducción a la fotosíntesis:

A pesar de la diferenciación tan clara que aporta en el índice, el principio del apartado 6.4 que titula “Fotosíntesis: la reacción lumínica” en la página 267, versa así:

“La capacidad de sintetizar compuestos orgánicos a partir de la energía lumínica y sustancias inorgánicas previas, caracteriza a los organismos fotoautótrofos; el proceso completo se llama fotosíntesis.”

Así, una vez más observamos que en la introducción más general del tema de la fotosíntesis, la definición incluye la idea de la síntesis de los compuestos orgánicos necesarios, no solo de azúcares, de glucosa o de triosas. De hecho el párrafo continúa de la siguiente manera:

“Por un lado, en este proceso se forman hidratos de carbono a partir del CO_2 de la atmósfera (asimilación del carbono). La energía lumínica sirve, por otro lado, para que se forme nitrógeno amoniacal a partir del nitrato absorbido (asimilación del nitrato) y para que el sulfato se transforme en sulfito (asimilación del sulfato). Como resultado, el carbono, el nitrógeno y el azufre se reducen; los electrones necesarios para ello provienen del agua en el caso de las plantas verdes, (...).

Con este texto deja bastante claro que no hay diferencia entre la asimilación del carbono, la del nitrógeno y la del azufre para considerar a uno dentro del proceso fotosintético y a los otros dos no. Además, el párrafo continúa y especifica que los cuantos de luz absorbidos por la clorofila liberan electrones que se van transfiriendo a través de una cadena de transporte de electrones hasta la ferredoxina que, reducida, sirve como dadora de electrones en la asimilación del nitrógeno y del azufre o para reducir los nucleótidos de pirimidina oxidados formando poder reductor. Así que no puede quedar más claro, ya desde el primer párrafo que trata la

fotosíntesis que es imposible separar los procesos de asimilación de nitrógeno y azufre de la fotosíntesis. El libro continúa explicando que el transporte fotosintético de electrones está acoplado al transporte de iones de H que se utiliza para la síntesis de ATP, que junto con el poder reductor, se aprovechan para la asimilación del CO₂. Parece que, así, de nuevo hace una pequeña diferencia entre la asimilación del CO₂ y la del nitrógeno y el azufre. Sin embargo, no podemos olvidar que ese ATP producido también es necesario para asimilación y la reducción de los nitratos y los sulfatos.

- División de la fotosíntesis en dos fases

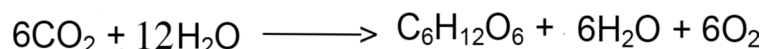
En la página 268, continuando con la introducción del capítulo, se explica la división tradicional de la fotosíntesis en dos fases:

“La síntesis de hidratos de carbono a partir de CO₂ se designa a menudo por reacción oscura porque no depende directamente de la luz, sino que por principio también podría desarrollarse a oscuras si se dispusiese de ATP y NAD(P)H. La reacción lumínica de las plantas verdes y los cianobacterios se desarrolla en las membranas de los tilacoides.”

De este párrafo podemos resaltar dos ideas, la primera que el libro propone, y explica la razón, de utilizar los términos de *fase oscura* y *fase lumínica* que ya hemos justificado como un error que genera problemas en los estudiantes. Y segunda, que se deja ver la ausencia de los procesos de reducción asimilatoria de nitratos y sulfatos como parte del proceso fotosintético. A partir de este momento y hasta los capítulos 6.6 y 6.7 no se vuelven a nombrar estos compuestos ni los productos que se forman a partir de ellos, como los aminoácidos.

El concepto de *fase oscura* vuelve a utilizarse en la página 288, en la introducción al capítulo 6.5 (“Fotosíntesis: el camino del carbono”) donde,

además, ofrece la fórmula que denomina “la igualdad fundamental de la fotosíntesis”:



- Reducción asimilatoria del nitrato y del sulfato

Al final de la introducción del capítulo 6.6 (“La asimilación del nitrato”), en la página 308 pone de manifiesto que los animales no poseen la capacidad de reducir el nitrato y que, por ello, dependen de la actividad metabólica de las plantas para conseguir los compuestos nitrogenados reducidos. Pero, en esta introducción no existe ninguna referencia a la necesidad de luz o al acople de este proceso a la maquinaria fotosintética.

En la misma página 308 explica lo que el libro denomina la “asimilación fotosintética del nitrato”. Con este título deja claro que considera que este proceso forma parte de la fotosíntesis, pero lo cierto es que en el texto, poco podemos encontrar que haga referencia a ello. Podemos encontrar un esquema del proceso en el que lo único que puede relacionarse con la fotosíntesis es que la luz incide en el tilacoide, lo cual reduce la ferredoxina y el título del pie de imagen “Asimilación fotosintética del nitrato y regulación”. En el texto no hay ninguna alusión a la relación entre la fotosíntesis y la asimilación del nitrógeno a excepción de la frase de la página 309 que dice:

“Tanto la producción de NH_4^+ como de NO_2^- , así como su aprovechamiento posterior dependen directamente de la luz.”

No aparece relacionado el ATP y el poder reductor necesario para la reducción del nitrato con la fotosíntesis de ninguna otra manera. No deja de

resultar curioso que el título deje claro un concepto que no aparece justificado en el texto de ninguna manera.

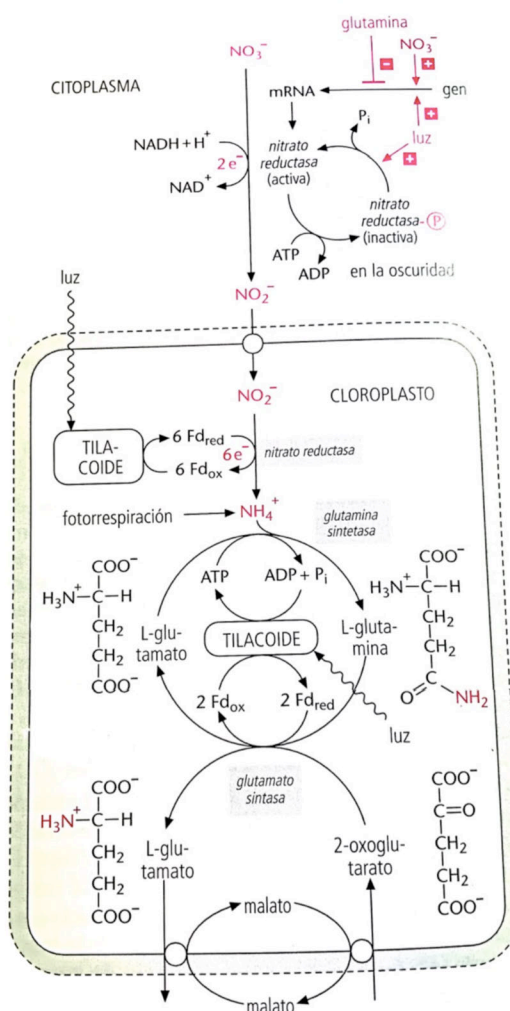


Imagen 4.1. Asimilación fotosintética de nitrato y regulación (Strasburger, p.308, 2003)

Sobre la asimilación del sulfato, su relación con el proceso de fotosíntesis queda reflejado exclusivamente en un esquema donde se vuelve a poner de manifiesto la relación entre la luz y la reducción de la ferredoxina que reduce el sulfito a sulfuro gracias a la sulfito reductasa y por la frase de la página 310:

“La planta absorbe azufre en forma de sulfato (...) a través de sus raíces lo reduce luego hasta el nivel de sulfuro(...). Esta reacción se da principalmente en los cloroplastos, donde luego forma parte de la fotosíntesis, (...).”

Con esto este libro da por terminados estos dos procesos y por justificado el título que les da: “Asimilación fotosintética del nitrato y del sulfato”.

Libro 4: Lincoln Taiz (2006)

Para poder examinar la última edición de este libro, tuvimos que examinar la cuarta edición en inglés, pero de este libro existe versión en castellano y es uno de los más utilizados por los estudiantes para preparar la asignatura de fisiología vegetal. Pero para que resulte más sencillo de entender, traduciremos los textos que copiemos directamente del libro, a excepción del índice.

- Índice

El libro se divide en dos temas introductorios sobre las células vegetales, la energía y las enzimas, y en tres unidades con varios temas cada una. La Unidad I se compone de 4 temas, uno de ellos sobre la nutrición mineral. Aunque pueda estar directamente relacionado con el aspecto que estamos analizando, en realidad este tema trata sobre la importancia de los minerales, sobre la contaminación y las consecuencias en los suelos y en las aguas por el exceso de fertilizantes, sobre los ciclos biogeoquímicos y otros temas de carácter más ecológico que fisiológico. La Unidad II trata los temas de bioquímica y metabolismo; y por último, la Unidad III incluye los temas acerca del crecimiento y el desarrollo de las plantas. Por lo tanto, la parte que hemos analizado incluye algunos de los temas de la Unidad II.

Unit II: Biochemistry and Metabolism

7. Photosynthesis: The Light Reactions	p.125
8. Photosynthesis: Carbon Reactions	p.159
9. Photosynthesis: Physiological and Ecological Considerations	p.197
10. Translocation in the Phloem	p.221
11. Respiration and Lipid Metabolism	p.253
12. Assimilation of Mineral Nutrients:	p.289
13. Secondary Metabolites and Plant Defense	p.315

En este caso la separación y diferenciación entre el metabolismo del carbono y el metabolismo del nitrógeno y del azufre, es mucho más drástica y aparente que en los casos anteriores. No sólo considera al metabolismo del carbono como un subapartado de la fotosíntesis, mientras que a los demás los mete dentro de un tema diferente, sin relación con la fotosíntesis, que denomina “asimilación de nutrientes minerales” sino que además, los separa totalmente, intercalando entre ambos procesos el transporte por el floema y los temas de catabolismo más típicos; la respiración y el metabolismo de los lípidos. De esta manera interpretamos que para tratar el tema del metabolismo de plantas considera lógico comenzar con la fotosíntesis ya que sería el primer paso en la nutrición vegetal al crear así los componentes orgánicos que van a necesitar las células vegetales en los temas 7, 8 y 9. Después, en el tema 10 se explica cómo se transportan esos nutrientes a todas las células, donde a continuación serán utilizados, por ejemplo para respirar o guardar sustancias de reserva (tema 11).

De esta manera está considerando así que todo lo producido por la planta que necesita ser transportado a las células por el floema, ya ha sido explicado con las reacciones del carbono (tema 8) dejando bastante claro que la única materia orgánica que la planta sintetiza y que después se distribuye a la totalidad de tejidos de la planta, son los azúcares. Así, olvida por completo moléculas tan básicas como los aminoácidos para la síntesis

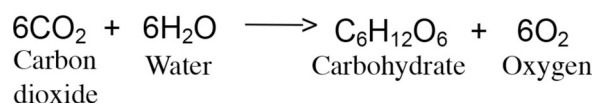
de proteínas. Ni siquiera considera oportuno poner el tema 12 a continuación de los temas 7, 8 y 9 por formar todos parte del anabolismo de la planta.

Mientras que el metabolismo del carbono recibe una atención de 38 páginas completas, el tema de la síntesis de nitrógeno orgánico a partir del inorgánico cuenta con menos de 5 páginas y del azufre con 2 páginas. El resto del tema 12 trata sobre de la formación del nódulo y la absorción de otros nutrientes minerales como el oxígeno, fosfato y cationes.

○ Introducción:

Este libro presenta un pequeño texto en la primera página de cada tema a modo de introducción, ofreciendo una visión general de lo que se va a trabajar en ese tema. En ese texto del tema 7, en la página 125, se puede leer lo siguiente:

“El término fotosíntesis significa literalmente “síntesis usando la luz”. Como veremos en este capítulo, los organismos fotosintéticos usan la energía solar para sintetizar compuestos de carbono que no podrían formarse sin la introducción de energía. Más específicamente, la energía lumínica conduce a la formación de carbohidratos y genera oxígeno a partir del dióxido de carbono y el agua:



(...) Este capítulo trata sobre el role de la luz en la fotosíntesis, la estructura del aparato fotosintético y el proceso que comienza con la excitación de la clorofila por la luz y termina con la síntesis de ATP y NADPH.”

Podemos comprobar claramente que este libro no concibe ningún otro proceso relacionado con la fotosíntesis distinto a la síntesis de carbohidratos. De esta manera resume el proceso completo con la fórmula ajustada y resumida de la producción fotosintética de glucosa y termina diciendo que la primera fase, que va a ser la primera que va a explicar termina con la producción de ATP y poder reductor. Posteriormente en el tema 12 hablará de que para reducir los nitratos y los sulfatos son necesarios el ATP y el poder reductor sintetizado en esta fase, pero hasta ese tema no hay ninguna pista que de a entender que estos procesos estén relacionados.

La introducción del tema 9, en la página 197, repite el mismo concepto:

“La conversión de la energía solar en energía química de compuestos orgánicos es un proceso complejo que incluye transporte de electrones y el metabolismo fotosintético del carbono.”

Ni siquiera cuando explica la *ferredoxina* en la página 147 hace ningún tipo de referencia a que esta proteína de membrana puede pasar los electrones a algún otro enzima que no sea la que reduce el NADP^+ cuando también es la responsable de la reducción de los compuestos de nitrógeno y de azufre en los cloroplastos.

- División del proceso fotosintético en dos fases

El libro coincide con los demás en dividir la fotosíntesis en dos fases, una que utiliza la luz para generar ATP y poder reductor, y otra que utiliza ese ATP y ese poder reductor para reducir los componentes inorgánicos y asimilarlos en compuestos orgánicos, aunque en este caso, solo considera la reducción del CO_2 . Sin embargo, en este libro no encontramos que se

haga referencia a los términos *fase lumínica* y *fase oscura* que, como ya hemos mencionado, tantos problemas genera en los estudiantes.

- Asimilación nitratos y sulfatos

Como ya se ha dicho, los procesos de reducción asimilatoria de los nitratos y los sulfatos se encuentran dentro de un tema mucho más general que denomina: “Asimilación de nutrientes minerales”. En la introducción de este tema 12, en la página 289, este libro ofrece la definición de lo que denomina asimilación de nutrientes:

“La incorporación de nutrientes minerales en sustancias orgánicas como pigmentos, cofactores enzimáticos, lípidos, ácidos nucleicos y aminoácidos se denomina asimilación de nutrientes.”

Esta definición parece un tanto vaga ya que no especifica que esos sean los únicos compuestos orgánicos que se consiguen mediante la denominada *asimilación de nutrientes*. Además, no se explica por qué la formación de compuestos carbonados no están incluidos en esta definición, a pesar de que el CO₂ no deja de ser también un nutriente inorgánico. A parte de esto, aunque el tema incluye la asimilación de fosfato, de oxígeno y de cationes como los de potasio, calcio y magnesio, en la introducción de la página 289 solo hace referencia a tres puntos:

- Reducción y asimilación de nitratos.
- Relación simbiótica de bacterias con plantas leguminosas para la fijación de N₂ atmosférico.
- Reducción y asimilación de sulfatos.

Este tema 12 hace una larga introducción de casi tres páginas (290-292) sobre el papel del nitrógeno en los ecosistemas y su ciclo biogeoquímico.

Posteriormente, en el apartado de "asimilación del nitrato" (página 292), no se hace ninguna referencia a la conexión de este proceso con la fotosíntesis en el texto, a pesar de describir minuciosamente las reacciones, las enzimas, los componentes y la localización de las reacciones. Sin embargo hay una figura en la página 293 cuyo pie de foto dice: *"Modelo del acoplamiento del flujo de electrones fotosintéticos, vía ferredoxina, a la reducción del nitrato por la nitrato reductasa."*

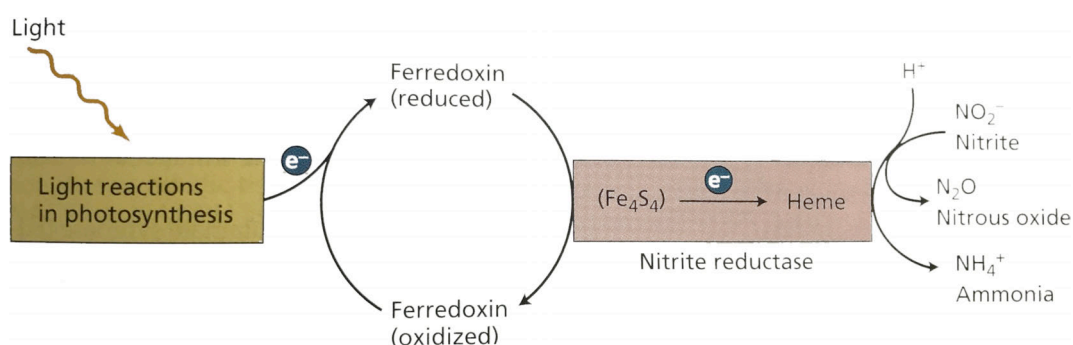


Imagen 4.2. Acoplamiento del flujo de electrones fotosintético en la reducción del nitrato. (Lincoln Taiz, p.293, 2006)

El texto no explica esta imagen, no hace ninguna referencia a que este proceso depende de la luz o de la ferredoxina que forma parte de la cadena de transporte electrónico de las membranas tilacoidales. Sin embargo, en esta figura se puede ver como los electrones que provienen de las reacciones lumínicas de la fotosíntesis reducen la ferredoxina, la cual está relacionada con el traspaso de electrones a la nitrato reductasa. De nuevo consideramos insuficiente la explicación que propone este libro a este proceso. Resulta una explicación vaga y que, sin duda, pasa desapercibida para los estudiantes que busquen respuestas.

Lo cierto es que, a pesar de que hemos considerado muy pobre el apartado de la asimilación del nitrato, el tratamiento que recibe el de la asimilación del sulfato (página 304) es aún más escaso, no llegando a

ocupar ni dos páginas. Además esta vez no encontramos ninguna referencia a la relación con la fotosíntesis en el texto ni en ninguna imagen.

Libro 5: Azcón-Bieto (2008)

Este libro también se organiza en tres partes, la primera de un solo tema a modo de introducción, la segunda se denomina “Nutrición y transporte” y la tercera parte que se llama “Desarrollo vegetal”. Los temas que interesan a esta investigación se encuentran en la Parte II.

- Índice:

Dentro de este bloque los capítulos 2, 3, 4 y 5 tratan sobre el transporte de sustancias por la planta. Los capítulos 6, 7 y 8 sobre la nutrición mineral. El capítulo 6 repasa los bioelementos necesarios para el mantenimiento de la actividad y el desarrollo de las plantas, explicando su función y las consecuencias de su falta; el tema 7 trata la absorción y el transporte de estos elementos por la planta; y el tema 8 se titula “Nutrición mineral y producción vegetal” y se centra en la producción agrícola y las plagas. Así pues, aunque estos capítulos traten el tema de la nutrición mineral, no contienen realmente lo que buscamos. Sin embargo, en los capítulos siguientes se trata el tema de la fotosíntesis y de la reducción de los nitratos y sulfatos.

9. La luz y el aparato fotosintético	p.165
10.Utilización de la energía luminosa en la fotosíntesis	p.191
11.Fijación del dióxido de carbono y biosíntesis de fotoasimilados....	p.211
12.Fotorrespiración y concentración del dióxido de carbono	p.227
13.Fotosíntesis, factores ambientales y cambio climático	p.247
14.La respiración de las plantas	p.265
15.Asimilación del nitrógeno y del azufre	p.287

16.Fijación biológica del nitrógeno	p.305
17.Introducción al metabolismo secundario	P.323

Una vez más descubrimos una distribución de los temas extraña que resulta difícil de justificar. Encontramos un primer capítulo introductorio al tema de la fotosíntesis, después uno con la fase fotoquímica y otro sobre los productos sintetizados durante la fase metabólica gracias a los intermediarios obtenido en la etapa anterior (aunque después analizaremos que cuando en el tema 11 habla de los “fotoasimilados” se refiere a la sacarosa y al almidón exclusivamente). El tema 12 trata el tema de la fotorrespiración que sería el proceso que se activa cuando aumenta demasiado la concentración de oxígeno, paralizando la fotosíntesis y por último, en el tema 13, expone los factores que afectan a la fotosíntesis. A pesar de que, como ya dijimos, no vemos adecuado tratar el tema de la fotorrespiración en este momento, ya que se trata de un proceso alternativo sin función descubierta y minoritario que se da solo en condiciones especiales. Por lo tanto consideramos más acertado terminar de explicar los distintos componentes que se reducen y se asimilan gracias a la fotosíntesis antes de comenzar con el tema de los factores que alteran el funcionamiento normal del proceso.

En cualquier caso, lo más llamativo es que, una vez más se explique la respiración en las plantas antes de la asimilación del nitrógeno y del azufre. Y, como ya hemos comentado, no encontramos ningún tipo de justificación para esta propuesta, ya que la respiración es un proceso completamente separado de la producción de componentes orgánicos por parte de la planta. De hecho es un proceso catabólico que degrada los hidratos de carbono, los oxida, para obtener energía en forma de ATP y tiene lugar en un orgánulo totalmente separado de los cloroplastos, en las mitocondrias.

Los tres últimos capítulos, marcando una separación clara entre ellos y el proceso fotosintético, se tratan los temas de la asimilación del nitrógeno y

del azufre (capítulo 15) y de la fijación biológica del nitrógeno (capítulo 16). Es importante destacar que esta fijación biológica del nitrógeno hace referencia a los procesos mediados por organismos procariotas que llevan a su incorporación en el suelo (normalmente en forma de nitratos, aunque también se considera al nitrógeno que se encuentra en forma de iones amonio) de los compuestos de nitrógeno asimilables por las plantas. Por supuesto, estos procesos que forman parte del ciclo biogeoquímico del nitrógeno son fundamentales para comprender en su conjunto, el flujo de materia a través de los ecosistemas. Pero, lo cierto es que, a excepción de la formación de nódulos radiculares en las leguminosas, los demás son procesos bacterianos que no están relacionados con la fisiología de las plantas, aunque sí esté relacionado con ellas desde un punto de vista ecológico.

Por último, el libro presenta un capítulo acerca del metabolismo secundario (capítulo 17) en el cual introduce las rutas de síntesis de aquellos metabolitos secundarios que fabrican algunos grupos taxonómicos de plantas, en condiciones ambientales específicas o en ciertas fases del desarrollo, como los pigmentos que dan coloración a las flores.

- Introducción a la fotosíntesis

Para introducir el tema de la fotosíntesis, este libro comienza hablando de la luz solar como la principal fuente de energía para la biosfera. Más adelante, en la página 166, bajo el epígrafe “Las plantas son organismos autótrofos fotosintéticos” donde se habla del origen de la vida y de la importancia a nivel planetario de este proceso, se dice:

“Anualmente, en la Tierra se almacena, por fotosíntesis, el equivalente energético a 80.000 toneladas de carbón, lo que corresponde a la

asimilación de unas 10^{10} toneladas de carbono en azúcares y otras fuentes materia orgánica.”

Aunque se propone la existencia de otros compuestos orgánicos sintetizados mediante la fotosíntesis, lo cierto es que el único elemento fotoasimilado que se considera es el carbono. Aunque con esta frase se refiera a los aminoácidos, a los ácidos grasos o a los nucleótidos, existen dos incoherencias asociadas a esta frase; la primera es que el único proceso que el libro va a incluir dentro de la fotosíntesis es la síntesis de azúcares, por lo tanto no se entiende que aquí se consideren otras posibilidades; la segunda sería que con esta frase solo se está considerando la asimilación del carbono y las únicas biomoléculas orgánicas que se pueden formar mediante la asimilación del carbono son los azúcares pues, excepto raras excepciones, solo poseen en su estructura átomos de carbono, de hidrógeno y de oxígeno. El resto de biomoléculas orgánicas (aminoácidos, nucleótidos y ácidos grasos) poseen otros elementos en su estructura, como el nitrógeno, el azufre o el fósforo, que se encuentran en el ambiente en formas inorgánicas, generalmente bastante oxidadas, y que deben ser reducidas para poder asimilarse y formar estas biomoléculas orgánicas.

- División de la fotosíntesis en dos fases

El siguiente epígrafe del tema 9 (página 167) se titula: “La fotosíntesis es un proceso biológico de fotoabsorción y fotoasimilación que consta de dos fases” y comienza así:

“La fotosíntesis es un proceso biológico complejo en el que pueden distinguirse dos fases bien diferenciadas: una primera de absorción y conversión de la energía, y otra de toma y asimilación biológica de los elementos constitutivos de la materia orgánica (C, H, O, N, S, etc.).”

Con este párrafo se deja claro que mediante la fotosíntesis se asimilan diferentes elementos para constituir la materia orgánica. Además un poco más adelante el texto continúa así:

“Los elementos constitutivos se toman de fuentes minerales inorgánicas (agua, H_2O ; dióxido de carbono, CO_2 ; nitratos, NO_3^- ; sulfatos, SO_4^{2-} , etc.) y se incorporan a biomoléculas orgánicas metabolizables.”

De todos los libros analizados, podríamos considerar que este es el que deja más claro que la asimilación de todos estos compuestos y la formación de moléculas orgánicas a partir de todos ellos es lo que se considera el proceso fotosintético. Por este motivo resulta difícil de justificar que en la organización del libro por capítulos (como ya hemos analizado con el índice) se muestre la idea contraria de que la fotosíntesis solo asimila CO_2 y que, por tanto, su único producto de biosíntesis son los azúcares.

En este epígrafe observamos también que, al igual que todos los libros, considera que la fotosíntesis es un proceso que puede dividirse en dos etapas pero, también por primera vez, encontramos que este libro deja claro que los términos tradicionales, *fase lumínica* y *fase oscura*, no es correcta:

“Tradicionalmente, estas fases se han denominado fase luminosa y fase oscura; pero esta nomenclatura no es del todo exacta, ya que actualmente sabemos que la luz es un factor esencial en toda la fotosíntesis como elemento de regulación y control en ambas fases. Así, se puede decir que hay una fotoabsorción de energía y una fotoasimilación de los elementos esenciales.”

Es cierto que el libro de fisiología vegetal de Barceló (2003) avisaba de que los términos de *fase lumínica* y *fase oscura* no debían inducir a error, pero este libro llega más allá, afirmando que el uso de estos términos no sería correcto.

○ Una nueva definición de fotosíntesis: una nueva contradicción

A pesar de lo claro que expone estas ideas, en esta misma página 167, muestra una contradicción enorme respecto a lo que acaba de explicar. El epígrafe siguiente se titula “Las reacciones fotosintéticas pueden expresarse en una ecuación global que incluye los componentes esenciales del proceso” y comienza así:

“La ecuación global de la fotosíntesis es:

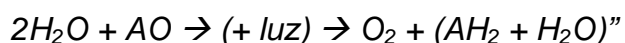


Esta ecuación corresponde a la fotosíntesis que hemos denominado oxigénica, en la que el oxígeno es el producto final, desprendido y liberado a la atmósfera y útil para el proceso biológico de la respiración. En esta ecuación, $(CH_2O)_n$ representa un azúcar como producto final fotosintetizado.”

A partir de este punto, y dentro de este epígrafe, en la página 168, se hace un pequeño recorrido sobre el cambio de concepción del proceso a lo largo de la historia buscando una ecuación global e integradora para la fotosíntesis. Así pasa por la fórmula de la fotosíntesis anoxigénica de las bacterias sulfúreas y compara ambas ecuaciones para llegar a la conclusión de que el azufre formado por estas bacterias es análogo al oxígeno producido por las plantas.

Posteriormente se presenta la ecuación de Hill que mostraba que el oxígeno producido durante la fotosíntesis no proviene del CO₂ sino del agua, para llegar, finalmente a escribir lo que denomina “una reacción global integradora”:

“Finalmente, se puede escribir una reacción global integradora de toda la fotosíntesis vegetal haciendo referencia de modo general a su segunda fase, en la cual se lleva a cabo la asimilación de los distintos elementos a partir de fuentes inorgánicas (CO₂, NO₃⁻, SO₄²⁻):



De esta manera encontramos en este libro el modelo que defendemos y proponemos para la enseñanza de la fotosíntesis. Aunque no deja de resultarnos extraño que con esta visión tan integradora del proceso, este manual universitario proponga un orden tan incoherente para sus capítulos, tratando en el medio, como tema 14, la respiración de las plantas. Dice en la página 168, después de llegar a esta *ecuación global e integradora de la fotosíntesis vegetal*:

“Dada la amplitud del tema, en los Capítulos 9 y 10 estudiaremos la primera fase del proceso fotosintético; en los Capítulos 11 y 12 la segunda fase fotosintética de asimilación del carbono, y en los Capítulos 15 y 16 la fijación-asimilación de nitrógeno y azufre, que constituyen parte esencial del anabolismo fotosintético vegetal.”

Por lo tanto, y a pesar de que este libro plantea el concepto de la fotosíntesis de la forma más correcta, según nuestro criterio, que hemos encontrado en un libro de texto, en nuestra opinión, resulta incoherente y contradictorio proponer esta idea dentro del texto pero tratar al resto de asimilados como secundarios posteriormente y separar físicamente los temas.

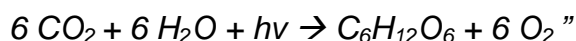
Así, a partir de este punto y hasta que comience con el capítulo 15 (“Asimilación del nitrógeno y del azufre”), el único elemento que trata como un fotoasimilado es el carbono a excepción de una explicación sobre la proteína ferredoxina del fotosistema I en la página 184:

“La ferredoxina (...) es una proteína redox multifuncional, involucrada en la reducción de una serie de enzimas solubles presentes en el estroma cloroplástico, llamadas enzimas dependientes de ferredoxina. Estas enzimas son la citada FNR; la ferredoxina-nitrito oxidorreductasa, o nitrito reductasa (implicada en el metabolismo del nitrógeno), la glutamina acetoglutarato aminotransferasa, o glutamato sintasa (implicada también en el metabolismo del nitrógeno) y la ferredoxina-tiorredoxina oxidorreductasa, o tiorredoxina reductasa (implicada en el metabolismo del azufre).”

Exponiendo así que dentro de la cadena de transporte de electrones fotosintético que se inicia con la excitación de los electrones donados por el agua por parte de la luz, una de las proteínas (la ferredoxina) puede dirigir el flujo de los electrones hacia la síntesis de NADPH, de NH_4^+ , glutamato o grupos tiol (de azufre).

Pero, obviando esta explicación sobre la ferredoxina, el resto del texto solo contempla la producción de azúcares como proceso fotosintético. Encontramos ejemplos de esto en la página 211, en la introducción del capítulo 11:

“La fotosíntesis es un proceso complejo, en el que intervienen múltiples reacciones bioquímicas que, en conjunto, requieren una elevada energía. La resultante del conjunto de reacciones puede sintetizarse mediante la siguiente ecuación”:



O cuando hace referencia de manera exclusiva al almidón y a la sacarosa en el epígrafe llamado “síntesis de fotoasimilados”.

- Asimilación del nitrógeno y del azufre

A modo de resumen podemos afirmar que lo que hemos encontrado en este capítulo ha sido la explicación más completa sobre estos procesos y el mayor número de referencias a la relación entre ellos y la fotosíntesis. Sin embargo, en nuestra opinión, lo que se deduce del modo en que trata estos temas y su contenido es que son procesos secundarios y que están *relacionados* con la fotosíntesis, no que forman parte de ella. Al menos, esa idea que dejaba tan clara en la página 167 de que las fuentes minerales inorgánicas que se reducen durante el proceso fotosintético son el agua, el dióxido de carbono, los nitratos y los sulfatos (entre otros), aquí se difumina bastante. Acepta en todo momento el papel de la luz como factor regulador del proceso y también explica que el origen de la energía y el poder reductor necesarios para la reducción y asimilación de los nitratos y sulfatos son las reacciones dependientes de la luz, pero no llega a afirmar con rotundidad que estos procesos formen parte de la fotosíntesis, solo que están relacionados; y, realmente, la diferencia aunque pudiera parecer sutil, no lo es.

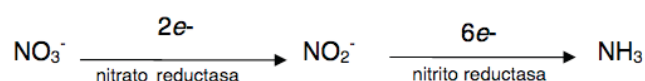
La introducción de la asimilación del nitrógeno en la página 287 dice:

“La asimilación del nitrato consta de tres etapas: 1) absorción; 2) reducción del nitrato a amonio; y 3) incorporación del amonio a esqueletos carbonados para la síntesis de aminoácidos, proceso que recibe el nombre específico de asimilación del amonio.”

Esta frase puede conducir a la idea de que la razón de que la asimilación de nitrógeno y azufre sean procesos secundarios comparados con la

asimilación del carbono es que estos deben incorporarse a esqueletos carbonados preexistentes. Dicho de otra manera, que para que se asimilen el resto de elementos, se ha tenido que asimilar el carbono antes, de manera que la reducción y asimilación del CO_2 sería siempre el primer paso y que el resto de biomoléculas sintetizadas son derivadas de los azúcares formados por la asimilación del carbono. Si se argumentara de esta manera, esto podría servir de excusa para “sacar” fuera del proceso fotosintético la asimilación de nitrógeno y azufre, y considerarlos procesos relacionados con la fotosíntesis. Pero lo cierto es que el carbono que se asimila a partir de la reducción del CO_2 , también se incorpora, según el ciclo de Calvin, a una molécula que actúa como esqueleto carbonado preexistente: la ribulosa-1,5-bifosfato; reacción catalizada por la enzima ribulosa 1,5 bifosfato carboxilasa oxidasa, conocida como RuBisCO. Así pues, una vez más no hay diferencias entre la manera en la que estos bioelementos se asimilan en las plantas que justifiquen esta concepción de la fotosíntesis.

En la página 288 plantea la ecuación general de la reducción del nitrato a amonio:



Y debajo de la reacción específica:

“El poder reductor requerido se genera en las reacciones lumínicas de la fotosíntesis o en la glucólisis y respiración.”

Esta es la única referencia que encontramos sobre la relación entre la asimilación del nitrato y la fotosíntesis hasta la página 294 donde plantea un epígrafe que titula: “El metabolismo del nitrógeno y el del carbono están interconectados y se regulan recíprocamente para mantener la adecuada proporción interna C/N”. Aquí volvemos a encontrar la idea de que son

procesos diferentes aunque estén relacionados y bajo este epígrafe vamos a encontrar las únicas referencias consistentes a esta relación. El texto comienza de la siguiente manera:

“La asimilación del nitrógeno por las plantas requiere poder reductor, ATP y esqueletos carbonados. El poder reductor y el ATP pueden ser suministrados por las reacciones lumínicas de la fotosíntesis, o por la glucólisis y la respiración. Los esqueletos carbonados son proporcionados por la oxidación de carbohidratos que, en último término, son formados por reducción fotosintética del carbono.”

De esta manera expresa de una manera más clara la idea anteriormente discutida de que el metabolismo del nitrógeno es dependiente de que antes haya ocurrido la asimilación del carbono.

El texto continúa explicando que la reducción del nitrato se puede dar en las partes fotosintéticas de la planta (generalmente, las hojas) o en partes no fotosintéticas (como la raíz). Induciendo de nuevo la idea de que aunque está relacionado con la fotosíntesis, en realidad es de forma secundaria, ya que se realiza tanto en tejidos fotosintéticos como no fotosintéticos; cuando en realidad, la asimilación del nitrógeno es un proceso que mayoritariamente ocurre en los cloroplastos de las hojas y solo una proporción bajísima del nitrato reducido se produce en la raíz.

Hablando del proceso que se da en las hojas dice:

“En las hojas, el NADH necesario para la reducción del nitrato a nitrito proviene, en su mayor parte, del NADPH generado fotosintéticamente en los cloroplastos, (...). En las hojas, la ferredoxina reducida que precisan la NiR y la Fd-GOGAT se genera fotoquímicamente en el cloroplasto.”

De esta manera se liga el proceso de reducción de nitratos a la fotosíntesis ya que el poder reductor necesario proviene de las reacciones fotosintéticas (al igual que el necesario para reducir el CO_2) y porque la ferredoxina, que requieren las dos enzimas que catalizan las reacciones de asimilación del nitrógeno, nitrito reductasa (NiR) y glutamato sintasa (GOGAT), procede de la excitación de la clorofila por la luz y el transporte de electrones en los cloroplastos.

Solo esta explicación y el siguiente esquema de la página 294 muestran la relación con la fotosíntesis:

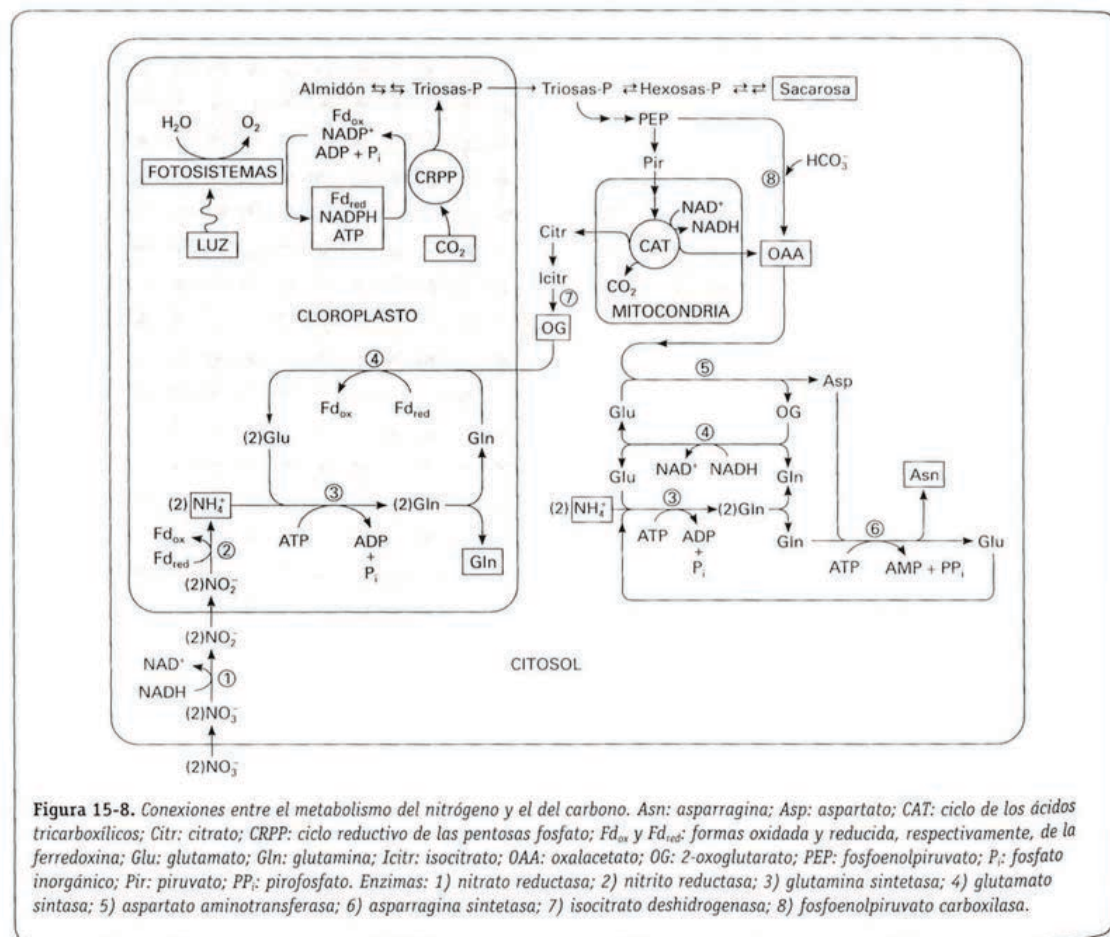


Imagen 4.3. Relación entre el metabolismo del C y del N (Azcon-Bieto, p.294, 2008)

De nuevo, no debemos olvidar que estos textos pertenecen a manuales diseñados, especialmente, para estudiantes de fisiología vegetal, por lo

tanto, no se trata tanto de discutir si lo que explican es correcto, técnicamente, sino de si, además, son didácticos y transmiten la idea de manera que los estudiantes puedan extraerla de manera eficaz y sencilla. De esta manera, aunque este esquema pueda ser correcto, no muestra la idea principal de forma correcta. ¿Por qué en el esquema se muestra que solo se utilizan los productos obtenidos en los fotosistemas para el ciclo reductivo de las pentosas fosfato (CRPP), a menudo denominado ciclo de Calvin, cuando el texto ha explicado que todos estos productos se utilizan para la reducción de los compuestos nitrogenados?, ¿por qué no muestra que el ATP, el NADH y la Fd_{red} proceden del transporte de electrones en los fotosistemas?

En lo referente a la asimilación del azufre, las referencias a su relación con la fotosíntesis son aún más escasas. En la página 298 encontramos la siguiente frase:

“Una vez que el sulfato ha sido absorbido por la raíz, es exportado en mayor parte a las hojas, donde puede ser almacenado en la vacuola, o bien ser transportado al interior de los cloroplastos, donde tiene lugar el proceso de asimilación.”

Y un poco más adelante añade:

“Ésta (la primera enzima reductora) utiliza NADPH como donador de electrones, por lo que la reducción de sulfato a sulfito consume, en último término, una molécula de NADPH generado fotosintéticamente. (...) En la segunda reacción, el sulfito es reducido a sulfuro libre mediante la transferencia de seis electrones suministrados por la ferredoxina reducida generada fotosintéticamente.”

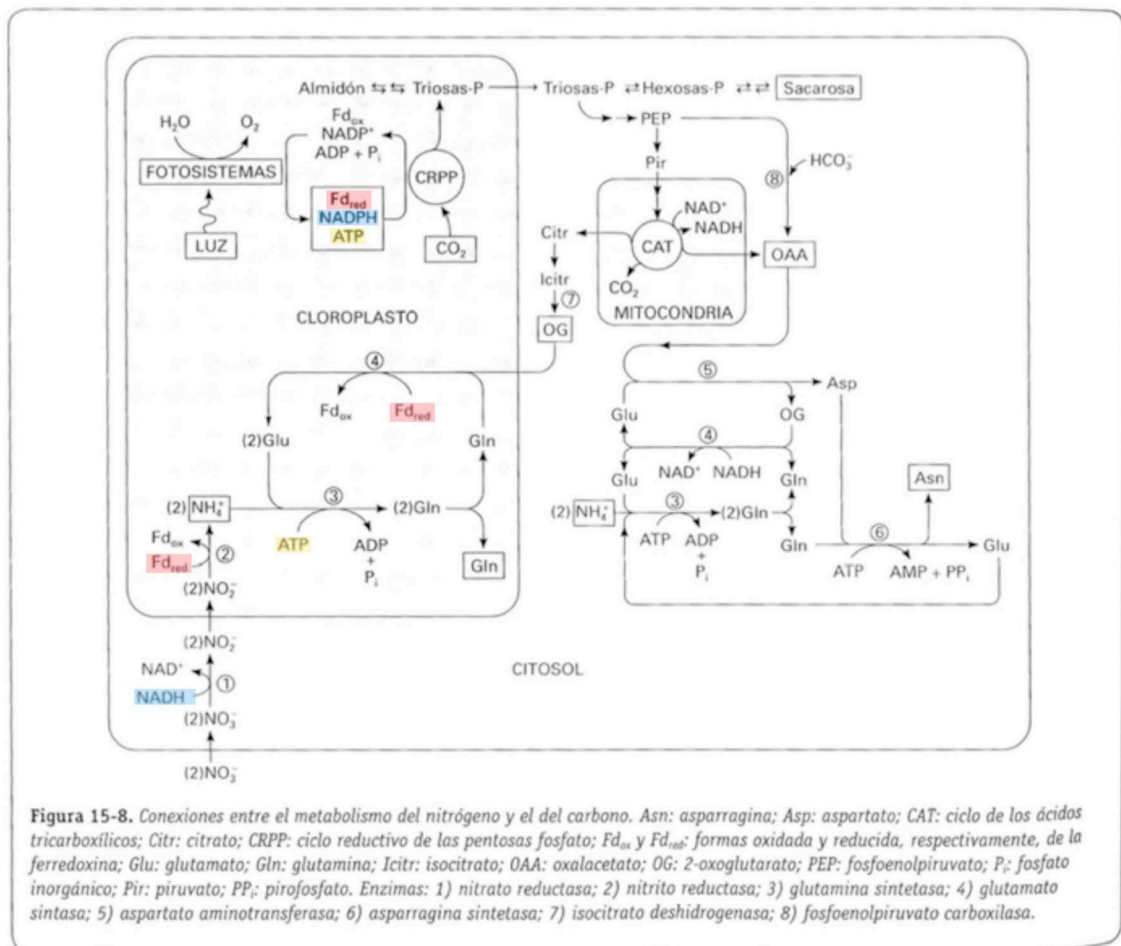


Imagen 4.4. Relación entre el metabolismo del C y del N (modificado) (Azcon-Bieto, p.294, 2008)

A parte de estas dos pequeñas referencias, no hay nada más sobre la reducción asimilatoria del azufre que explique su relación con la fotosíntesis, así que, para este proceso, más que para los demás, será tarea del lector inferir lo que tan claramente exponía 131 páginas antes, en la página 167, donde explicaba que el proceso fotosintético incluía la asimilación de todos los elementos necesarios para la biosíntesis de todos los compuestos orgánicos necesarios para la vida de la planta.

4.1.2. Análisis comparativo de los manuales a partir de 5 cuestiones

El estudio se ha basado en analizar cinco cuestiones en cada uno de los manuales que pretenden comprobar si los textos tratan el proceso de la fotosíntesis de una forma global, en la cual el objetivo del proceso sería la producción final de todos los nutrientes orgánicos básicos para el desarrollo de la planta o si, en cambio, considera que la finalidad de la fotosíntesis es exclusivamente la síntesis de azúcares.

Las cinco cuestiones son las siguientes:

1. Definición general de la fotosíntesis que dan los textos y utilización del esquema de la fotosíntesis dividido en dos etapas.
2. Separación del metabolismo del nitrógeno y del azufre del metabolismo del carbono.
3. Importancia que se da a los procesos de asimilación fotosintética del nitrógeno y del azufre medido según la cantidad relativa de texto que se dedica a estos apartados en comparación con la que se dedica a la del carbono.
4. Relación que se hace entre el metabolismo del nitrógeno y del azufre con la luz y la fotosíntesis dentro del desarrollo de estos temas en particular.
5. Cualquier error en el tratamiento de la fotosíntesis ajeno a este tema en particular pero reseñable para la didáctica del proceso en cualquier caso.

El estudio se ha basado en analizar estas cinco cuestiones en cada uno de los manuales. Aunque este análisis ha buscado errores conceptuales,

contradicciones de cualquier tipo dentro del tema de la nutrición vegetal, no podemos olvidar que son manuales especializados y que no es fácil encontrar fallos evidentes en el contenido o en los conceptos particulares. Así que, aunque sí se ha encontrado alguno, lo que se pretende es comprobar si los textos tratan el proceso de la fotosíntesis de una forma global y coherente, según nuestro punto de vista, en la cual el objetivo del proceso sería la producción final de todos los nutrientes orgánicos básicos para el desarrollo de la planta o si, en cambio, considera que la finalidad de la fotosíntesis es exclusivamente la síntesis de azúcares.

- **Primera cuestión:** Definición de fotosíntesis y división del proceso en dos fases

Todos los manuales dividen la fotosíntesis en las mismas dos fases. La primera fase sería la etapa fotoquímica o dependiente de luz en la que se obtiene el ATP y el NADPH como los productos finales y la segunda etapa sería la puramente metabólica o asimiladora donde, a partir de esa energía y ese poder reductor, se obtendrían como productos las moléculas orgánicas que sirven de nutrientes orgánicos para la planta.

En lo que se refiere al uso de los términos de *fase lumínica* y *fase oscura* los libros 1 y 4 no utilizan estos términos; el libro 3 los usa y los define como parte de los conceptos del tema y los libros 2 y 5 los nombran pero hacen algún tipo de advertencia sobre los errores asociados. El libro 2 resalta que el término *fase oscura* no significa que se de por la noche o cuando no hay luz, sino que si se aportaran los intermediarios que se consiguen en la fase dependiente de luz (ATP y poder reductor), teóricamente, la luz no sería necesaria. Es importante resaltar que esto no es así, ya que varios pasos metabólicos se encuentran regulados por la luz. De hecho, la enzima RuBisCO que responsable de la fijación del CO₂ es dependiente de luz. El libro 5, en cambio, defiende que el uso de esos

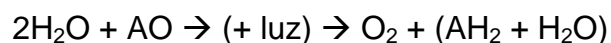
términos se debe a causas tradicionales pero que debe considerarse erróneo, explicando los motivos que se acaban de exponer.

Respecto a la definición de fotosíntesis que ofrecen, ocurre con frecuencia que dentro del mismo libro se dan diferentes definiciones del proceso según el tema o el capítulo. Sin embargo, con que el libro ofrezca, aunque sea una sola vez una definición integradora, abierta a otros compuestos distintos de los azúcares, consideraremos que el libro contempla esta posibilidad.

Analizando los manuales observamos que el 1 y el 4 no dan ninguna definición del proceso abierta a la producción de otros compuestos orgánicos además de los azúcares. Esto quiere decir que ni siquiera dan una definición general en la cual digan que la finalidad de la fotosíntesis es la síntesis de materia orgánica por la planta, la génesis de biomasa vegetal o el reciclado de materia. El proceso de fotosíntesis se reduce al plano metabólico sin cobrar ningún sentido global, ni adquirir un sentido amplio a nivel planetario. Esto es, sin ninguna duda, algo muy grave. Sin embargo el libro 2, en una de sus múltiples definiciones, explica:

"Es un proceso de oxidorreducción en que un donador de electrones, el agua, se oxida y un aceptor, el anhídrido carbónico u otro aceptor adecuado, como puede ser el nitrato o el sulfato, se reduce."

Tras esta definición deja claro que considera la asimilación del nitrato y el sulfato como procesos que forman parte de la fotosíntesis. El libro 3 lo explica como un proceso completo de síntesis de compuestos orgánicos a partir de energía lumínica y sustancias inorgánicas previas. Y el libro 5 ofrece incluso una reacción integradora de toda la fotosíntesis vegetal:



Donde AO puede ser sustituido por cualquiera de las fuentes inorgánicas (CO_2 , NO_3^- , SO_4^{2-}).

En estos casos en los que los manuales consideran que mediante la fotosíntesis se sintetizan los componentes orgánicos necesarios para la vida de la planta, lo que podemos observar es una enorme incoherencia entre esta visión y el orden y tratamiento que se da a los procesos de reducción y asimilación del nitrógeno y el azufre.

- **Segunda cuestión: Separación del metabolismo del nitrógeno y del azufre del metabolismo del carbono**

Los cinco manuales muestran esta división en sus índices organizando en temas, capítulos o apartados distintos y siempre consecutivos la etapa de fotofosforilación y la de asimilación del CO_2 . Sin embargo, en estos temas o epígrafes jamás se contempla ningún otro compuesto diferente al CO_2 . Este punto resulta muy llamativo ya que, como hemos visto, tres de los cinco manuales admite la síntesis de otros componentes además de los azúcares y la asimilación de otros elementos diferentes al carbono. Además todos los libros admiten la división entre una fase fotoquímica y otra puramente metabólica que utiliza como sustratos los productos generados en la primera fase. Bajo este punto de vista, no entendemos qué criterio utilizan para considerar que la asimilación del CO_2 forma parte de la fotosíntesis y la del nitrato y el sulfato no, cuando esos principios básicos son los mismos.

Como ya se ha dicho, todos los libros separan en temas distintos el metabolismo del carbono del metabolismo del nitrógeno y del azufre; la cuestión es analizar cuánto los separan. En el caso del libro 1, que es el más antiguo, solo usa un tema para tratar el tema de la fotosíntesis y todos los conceptos y procesos relacionados con ella, por lo tanto, solo podemos

hablar de epígrafes. En este libro la asimilación de nitratos y sulfatos son tratados como un subapartado dentro de un epígrafe denominado "Otros procesos energizados por la luz" que se encuentra inmediatamente después del denominado "Metabolismo del carbono en la fotosíntesis". Aunque consideramos un acierto colocar un tema seguido del otro, tanto por el título que les da a cada uno como por el contenido de las explicaciones, deja claro que los procesos de asimilación de nitratos y sulfatos no se encuentran relacionados con la fotosíntesis, aunque tengan similitudes.

En el caso de los libros 2 y 3 la separación es igual de clara, a pesar de que estos libros consideran la posibilidad de la síntesis de otros compuestos en la fotosíntesis. En estos casos, en cambio, no tratan la asimilación del nitrógeno y del azufre como un epígrafe o subapartado dentro de otro tema sino que se consideran dos temas propios consecutivos al de asimilación del carbono. En el libro 2, por ejemplo, los dos temas anteriores se llaman: "Fotosíntesis: la reacción lumínica" y "Fotosíntesis: el camino del carbono", mientras que estos se denominan: "La asimilación del nitrato" y "La asimilación del sulfato", dejando así claro que estos procesos no son parte de la fotosíntesis.

Los casos más llamativos serían los libros 4 y 5; en ambos libros no solo se separan en temas distintos el metabolismo del carbono del metabolismo del nitrógeno y del azufre sino que además entre ellos se introduce otro tema que no tiene ninguna relación con la fotosíntesis ni con ningún proceso de síntesis: la respiración.

- **Tercera cuestión:** Importancia que se da a los procesos de asimilación de nitratos y sulfatos

Como podemos comprobar en la Tabla 4.1, en todos los libros se da una importancia mínima a la asimilación de nitratos y sulfatos comparada con la que se da a la asimilación del dióxido de carbono. Además, otro dato que resulta curioso es que a pesar de que la reducción de sulfato y de nitrato son dos procesos con muchas similitudes y cuya finalidad es la misma, la síntesis de otras biomoléculas orgánicas como los aminoácidos, en todos los manuales se le da una mayor relevancia a la asimilación del nitrato que a la del sulfato. Una causa de esta diferencia podría ser el conocimiento que se tiene hoy en día de cada uno de estos procesos. Parece ser que se tiene bastante seguridad en cuáles son las rutas de reducción y asimilación del nitrógeno en las plantas, sin embargo aún quedan algunos puntos por esclarecer en lo que se refiere a las rutas del azufre.

	C	N	N/C	S	S/C
Libro 1	32	0,5	0,02	0,5	0,02
Libro 2	24	6	0,25	4	0,17
Libro 3	19	2	0,11	1	0,05
Libro 4	38	5	0,13	2	0,05
Libro 5	31	10	0,32	4	0,13

Tabla 4.1: Se reflejan el número de páginas dedicadas a cada uno de los procesos de asimilación fotosintéticos y las relaciones entre las páginas que se dedican a explicar la fijación de nitrato y el sulfato frente a las que se utilizan para el carbono.

- **Cuarta cuestión:** Relación que se hace entre el metabolismo del nitrógeno y del azufre con la luz y la fotosíntesis

El libro 1 admite que el poder reductor y el ATP generados por la luz son los responsables de la reducción de los nitratos, sin embargo en ninguna

otra parte del libro se relaciona con el proceso de la fotosíntesis. El libro 2 solo relaciona ambos procesos cuando dice:

“A su vez, el NO_3^- del suelo pasa a ser la fuente principal de nutrición del N para las plantas en donde, en gran parte, experimenta un proceso de reducción asimilatoria de NO_3^- a NH_4^+ , que está ligada fundamentalmente al proceso fotosintético.”

La frase se encuentra en medio de la explicación del ciclo del nitrógeno general en términos ecológicos más que fisiológicos o metabólicos. Después, en la introducción del proceso, antes de desarrollarlo dice que la mayoría del nitrato viaja por el xilema hacia las hojas donde ocurre el proceso de reducción y asimilación fotosintética de los nitratos. En el libro 3 curiosamente, a parte del propio título del epígrafe *“Asimilación fotosintética del nitrato”* y de un esquema en el que la luz que incide en el tilacoide produce la reducción de la ferredoxina, no hay ninguna alusión a la relación que buscamos. Y en el caso del azufre dice:

“La planta absorbe azufre en forma de sulfato (...) a través de sus raíces lo reduce luego hasta el nivel de sulfuro(...). Esta reacción se da principalmente en los cloroplastos, donde luego forma parte de la fotosíntesis, (...).”

En este caso también hay un esquema donde se muestra la luz y la reducción de la ferredoxina que reduce el sulfofuro a sulfuro gracias a la sulfuro reductasa.

En el libro 4 el apartado de "asimilación del nitrato" no hace ninguna referencia a la conexión de este proceso con la fotosíntesis en el texto, a pesar de describir minuciosamente las reacciones, las enzimas, los componentes y la localización de las reacciones. Sin embargo hay una imagen cuyo pie de foto dice así:

“Modelo de acoplamiento del flujo de electrones fotosintéticos, vía ferredoxina, a la reducción del nitrito por la nitrito reductasa”.

Lo único que se muestra en la figura es cómo los electrones que provienen de las reacciones lumínicas de la fotosíntesis reducen la ferredoxina, la cual parece estar relacionada con el traspaso de electrones a la nitrato reductasa para activar su grupo hemo. De nuevo una explicación vaga, insuficiente y, sin ninguna duda, incomprensible para los estudiantes que busquen respuestas en este libro. En el caso del apartado "asimilación del sulfato" no aparece ninguna conexión con la fotosíntesis. El libro 5, en las 10 páginas de desarrollo del tema de la asimilación del nitrato solo lo relaciona con la fotosíntesis con esta frase:

“El poder reductor requerido se genera en las reacciones lumínicas de la fotosíntesis o en la glucólisis y respiración.”

En el caso de la asimilación de sulfato, justo después de decir lo parecido que es este proceso al del nitrato añade:

“Ésta utiliza NADPH como donador de electrones, por lo que la reducción de sulfato a sulfito consume, en último término, una molécula de NADPH generado fotosintéticamente.”

En ningún caso hace referencia al papel de la ferredoxina para reducir el nitrito o el sulfito.

Lo que todos libros hacen es relacionar la luz y/o la concentración de CO₂ con la regulación de la asimilación de los nitratos; sin embargo no podemos considerar estas referencias válidas, ya que solo serían factores de control de actividad, no pueden considerarse las relaciones entre la fotosíntesis y la reducción de los nitratos y los sulfatos.

- **Quinta cuestión: Otros errores en la enseñanza de la fotosíntesis**

Aunque no es normal encontrar en este tipo de libros errores claros en el tratamientos de los temas, no podemos obviar ciertas ideas que aparecen en los textos cuya problemática en la enseñanza de este proceso está muy apoyada por la investigación al respecto. Por ejemplo, en la página 125 del libro 1 encontramos la siguiente frase:

“Las plantas, como los animales, obtienen la energía necesaria para los procesos metabólicos fundamentalmente mediante la oxidación de los azúcares, proceso exergónico que, como tal, libera energía. El proceso contrario, la síntesis de azúcares a partir de CO₂, requiere por tanto un aporte de energía: la luz en los organismos fotosintéticos”

Podríamos considerar que lo llama “proceso contrario” por el hecho de que uno es la “degradación” de azúcares y el otro la “síntesis” de azúcares, pero en cualquier caso considerar que la fotosíntesis es el proceso contrario a la respiración se puede considerar un error importante que conlleva la aparición de ideas alternativas y erróneas asociadas en los estudiantes de todos los niveles educativos.

Aunque ya se ha comentado, el uso de los términos *fase oscura* y *fase lumínica* es otra de las causas analizadas de formación de ideas alternativas en los estudiantes. Es cierto que los manuales tratan estos términos de manera diferente pero en aquellos en los que estos términos aparecen pueden producir concepciones alternativas.

En el libro 2, en la página 177 se puede leer:

“En los experimentos de Blackman se concluía que en la fotosíntesis actúan dos procesos: uno oscuro (dependiente de la concentración de CO₂) y otro luminoso. (...). Experimentos posteriores han confirmado la

utilidad de la separación conceptual de ambos procesos, oscuro y luminoso.”

Aunque pocas líneas más abajo especifica:

“Los términos operacionales de fases oscura y luminosa no deben inducir a confusión; en la naturaleza ambas fases se producen en la luz pero, experimental y transitoriamente, una de ellas se puede realizar en la oscuridad.”

Y en el libro 3, en la página 268 dice:

“La síntesis de hidratos de carbono a partir de CO₂ se designa a menudo por reacción oscura porque no depende directamente de la luz, sino que por principio también podría desarrollarse a oscuras si se dispusiese de ATP y NAD(P)H. LA reacción lumínica de las plantas verdes y los cianobacterios se desarrolla en las membranas de los tilacoides.”

4.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS CUESTIONARIOS

El estudio sobre los conocimientos sobre la nutrición de las plantas de los futuros profesores de biología de Secundaria y Bachillerato se llevó a cabo mediante un cuestionario a los estudiantes del Máster de Formación del Profesorado en la especialidad de Biología y Geología, ya hoy en día es esta titulación la que habilita para ejercer como profesor en estos niveles. Estos cuestionarios fueron contestados por 186 alumnos que han cursado el Máster de Formación del Profesorado en la especialidad de Biología y Geología en seis cursos consecutivos (2011-12, 2012-13, 2013-14, 2014-15, 2015-16 y 2016-17) en la Universidad Complutense de Madrid, asegurando que para la fecha de realización, aquellos estudiantes que no fueran de la rama de la

biología, hubieran cursado la parte de la nutrición de las plantas en la asignatura *Complementos de biología* del Máster.

El cuestionario está compuesto de 14 preguntas divididas en dos partes, las seis primeras cuestiones son afirmaciones que los estudiantes deben marcar como verdaderas o falsas y las ocho últimas cuestiones son preguntas de elección múltiple con solo una de las opciones válida.

4.2.1. Análisis del porcentaje de acierto-error de cada pregunta

Lo primero ha sido analizar cada pregunta de forma independiente; comprobar el nivel de conocimiento que tienen los futuros profesores de Secundaria sobre las cuestiones anteriormente explicadas. Insistimos en el carácter genérico y poco especializado de los conceptos por los que se preguntan en este cuestionario.

- Preguntas tipo verdadero/falso: de la pregunta 1 a la 6

Estas cuestiones son, en principio, más sencillas; ya que solo tienen dos opciones (verdadero o falso). En cambio, también es cierto que algunas de estas preguntas está formuladas de manera que después puedan compararse con algunas de las preguntas de la segunda parte del cuestionario, ya que preguntan más o menos lo mismo o porque, de alguna manera, están relacionadas en contenidos, de manera que conocer la respuesta de una hace muy probable conocer o poder inferir la respuesta de la otra.

Sin embargo, este no es el caso de las preguntas 2 y 5 del cuestionario:

2. Es peligroso dormir con plantas por la noche porque consumen oxígeno.
5. Las raíces son la boca de las plantas.

Estas dos preguntas solo hacen referencia a dos preconceptos muy llamativos presentes en muchos estudiantes que tienen su origen en el conocimiento popular pasado de padres a hijos generación tras generación desde hace varios siglos.

En el caso de la pregunta 2, ya se ha comentado que esta idea proviene del s. XVIII del investigador holandés Ingenhousz, al que debemos la idea de que las plantas de interior, en la oscuridad, envenenan el aire y por ello las plantas y flores deben eliminarse de los dormitorios por las noches.

En el caso de la pregunta 5 es aún más llamativo puesto que la idea de que las raíces son la boca de las plantas proviene hace más de 2300 años, del filósofo Aristóteles que investigó el funcionamiento de las plantas e intentó darle un sentido desde el punto de vista de lo que se entendía entonces sobre la fisiología de los animales y del ser humano. De nuevo, se trata de una idea que podría calificarse de infantil, en lo que a los conocimientos científicos se refiere y por ello está presente sobre todo en la Educación Primaria y debería estar solucionada ya en las edades de Secundaria.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en forma de porcentaje de estudiantes que respondieron de forma correcta, porcentaje de respuestas incorrectas y porcentaje de alumnos que no respondieron a cada pregunta en este primer apartado de preguntas tipo “verdadero/falso” de los cuestionarios y se irán analizando pregunta por pregunta de forma independiente. Más adelante se mostrarán las relaciones entre distintas preguntas y se analizarán desde este punto de vista.

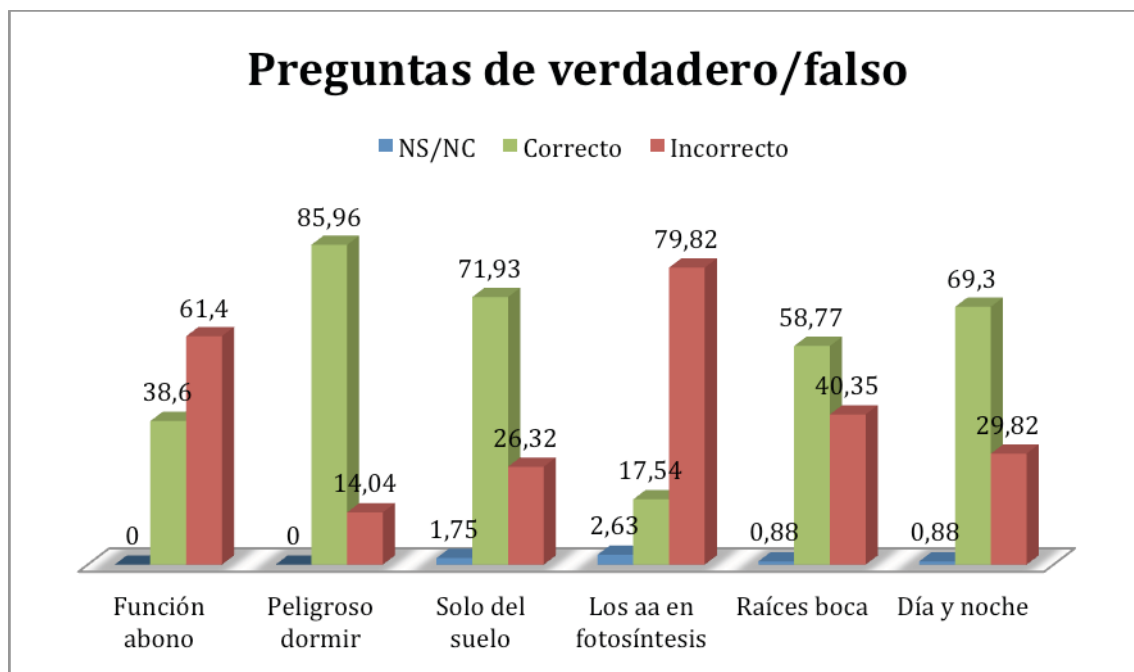


Gráfico 4.1. Preguntas de verdadero y falso. Porcentaje de acierto y error.

Pregunta 1. La finalidad del abono es aportar los nutrientes orgánicos necesarios para la planta. (Nombrada en el gráfico 4.1 como: “Función abono”)

Como ya se ha explicado anteriormente, esta pregunta analiza algo tan básico como la comprensión del concepto de “nutrición autótrofa”. En la bibliografía utilizada se defiende que el concepto de nutrición autótrofa se aprende de memoria, usándose incluso frases incorrectas asociadas de forma indiferente a plantas y a seres autótrofos de forma reiterada por parte de los libros y profesores como por ejemplo:

- Las plantas fabrican su propio alimento.
- Las plantas se alimentan por sí mismas.

Estas dos frases se utilizan para explicar el concepto de nutrición autótrofa y, sin embargo, ofrece dos ideas sobre las plantas que, además, son erróneas. No se duda de que en estos niveles los encuestados, licenciados

o graduados en carreras de ciencias, saben que los autótrofos sintetizan materia orgánica, de aquí la sorpresa cuando más de un 60% considera que la finalidad del abono es aportar los nutrientes orgánicos que necesitan las plantas. Solo el 38,6% marcó como falsa esta afirmación (gráfico 4.1).

Esto señala una falta muy grave y generalizada de comprensión significativa sobre conceptos tan básicos como la nutrición autótrofa, los productores, las redes tróficas y el reciclado de la materia en general. Estos no pueden considerarse conceptos baladíes puesto que implican ramas del conocimiento biológico desde niveles de organización de la materia tan pequeños como el metabolismo hasta los niveles más elevados de comunidad o la propia biosfera.

Pregunta 2. Es peligroso dormir con plantas por la noche porque consumen oxígeno. (Nombrada en el gráfico 4.1 como: “Peligroso dormir”)

Con esta pregunta comprobamos que casi el 86% de los futuros profesores consideran incorrecta la idea de que sea peligroso dormir con plantas. Parece que sí que hay una disminución de este preconceito según subimos el nivel de formación en ciencias, ya que según la bibliografía, en los estudiantes de Secundaria está aún muy presente (Cañal, 1990; Charrier & Obenat, 2001; Köse, 2008). Como ya ha sido explicado anteriormente, se da por hecho que la formación en ciencias produce un decremento de esta idea errónea en los estudiantes. Así que en este caso parece cumplirse.

Aún así, y puesto que la idea tiene tan poca base científica e, incluso, experimental para cualquiera que haya compartido habitación alguna vez para dormir, resulta extraño que haya un 14% de los estudiantes del Máster de Formación del Profesorado que consideren verdadera esta afirmación. Puede ser que esta pregunta demuestre más que, a menudo, cuando se

contestan estas preguntas, no utilizamos la lógica ni el razonamiento, sino que se contesta lo que se recuerda de una idea aprendida, sin despertar en nosotros las ganas de revisarla cuando se presenta la oportunidad. Queremos creer que si les pidiéramos a los encuestados que pensarán sobre ello, llegarían a la conclusión de que no tiene ningún sentido. A pesar de ello, no hay que olvidar que se trata de personas que se están formando para ser profesores de ciencias, así que no podemos hacer de menos este resultado.

Pregunta 3. Las plantas obtienen todos los nutrientes inorgánicos que necesitan del suelo. (Nombrada en el gráfico 4.1 como: “Solo del suelo”)

La idea de que las plantas “comen tierra” típica de niveles de Infantil y Primaria, debería estar completamente superada en los niveles de Secundaria y Bachillerato, por lo que damos por hecho que los futuros profesores no tienen ninguna duda al respecto. Sin embargo, se considera un problema que más de una cuarta parte de los encuestados hayan olvidado la necesidad de tomar CO_2 de la atmósfera por parte de las plantas. Solo el 71,92% de los estudiantes del Máster contestaron correctamente a la pregunta, siendo este concepto algo fundamental y básico para la comprensión de la nutrición vegetal, puesto que el CO_2 atmosférico es la fuente de carbono para la producción de toda la materia orgánica que las plantas fabrican.

Aunque pueda verse como un despiste, el cuestionario no es largo y en la pregunta 9, que se encuentra en la misma cara que esta misma, se pregunta por la función del CO_2 , dejando pocas excusas para estos resultados.

Pregunta 4. La síntesis de aminoácidos para formar proteínas forma parte del proceso fotosintético. (Nombrada en el gráfico 4.1 como: “Los aa en fotosíntesis”)

Este punto en particular es uno de los más claves de este estudio, puesto que esta tesis defiende como un error y una muestra de desestructuración de la enseñanza de la nutrición vegetal el que no se integre dentro del proceso fotosintético la síntesis de los demás componentes orgánicos, solo de la glucosa en particular o de los glúcidos en general. Aún así, el análisis de esta pregunta no puede hacerse solo desde el punto de vista del porcentaje de encuestados que se “equivocan” respondiendo a esta pregunta, sino abriendo un poco más las miras y analizando las causas de estas respuestas.

Resulta lógico que esta sea una de las preguntas con un mayor índice de error, teniendo en cuenta que, como ya hemos resaltado anteriormente, este punto es uno de los más conflictivos y que reúne un mayor número de incoherencias en los libros de textos especializados. Ni siquiera los profesores o especialistas en la materia parecen ponerse de acuerdo en la terminología a usar al respecto. Así pues con esta pregunta (al igual que con la 7 y la 8) no pretendemos poner de manifiesto el gran número de alumnos del Máster de Formación del Profesorado que cometen errores sobre el proceso de fotosíntesis, sino apoyar la tesis de la desestructuración del conocimiento que se transmite (tanto en los libros de texto como por parte de los profesores) sobre el proceso en sí. Los resultados de esta pregunta ponen de manifiesto la urgencia de una revisión de los conceptos básicos sobre la nutrición, la alimentación, el reciclado de la materia en los ecosistemas, las cadenas tróficas, los productores, los seres autótrofos y la fotosíntesis para darles una coherencia más universal. O dicho de otra manera, que no dependa de la disciplina particular dentro de la biología que se esté trabajando que se trate o defina estos conceptos de una manera o de otra, sino que se les

dote de una consistencia válida para cualquier parcela de la biología en el que se traten. Un ejemplo de esto ya fue explicado anteriormente cuando se puso de manifiesto las enormes divergencias y contradicciones en los términos de nutrición-alimentación y nutriente-alimento. Otro ejemplo podría ser el trato diferencial constante que se le da a las plantas cuando se explica su nutrición en términos fisiológicos, donde lo que fabrican las plantas son azúcares, exclusivamente; y cuando se trabaja su papel como productores dentro de los ecosistemas. En este último caso, los productores se definen como aquellos seres que fabrican materia orgánica a partir de materia inorgánica usando una fuente de energía externa, y se remarca este papel fundamental para el reciclado de la materia. Se pregunta de dónde, si no de los productores, obtenemos los demás organismos todos los nutrientes orgánicos. No solo eso, es que si las plantas están formadas y necesitan para vivir todas las biomoléculas orgánicas y solo toman del medio moléculas y compuestos inorgánicos como agua, CO_2 y sales minerales, obviamente deben ser capaces de sintetizar todas las moléculas orgánicas, no solo los azúcares.

La razón de esta diferencia parece indicar que cuando se trabaja con ecosistemas nos permitimos ser más laxos. La ecología es vista como una ciencia holística en la que las mediciones no son exactas sino conceptuales. Sin embargo, a nivel molecular, químico y fisiológico nos exigimos más exactitud, esperamos que las cifras cuadren y que los átomos de los reactivos sean los mismos que los átomos de los productos. En el momento en el que se escribe una fórmula química, esta debe ir ajustada y lo cierto es que la producción de glucosa a partir de CO_2 y agua es una fórmula bonita y sencilla de ajustar. Introducir a la ecuación otras moléculas, como los 20 aminoácidos para formar las proteínas, dificultaría mucho la sencillez y la elegancia de la fórmula de la síntesis de la glucosa.

Como ya se ha expuesto, los dos profesores del Departamento de Fisiología Vegetal de la Universidad Complutense de Madrid que fueron

entrevistados a este respecto reconocieron que el único motivo que ellos encontraban para darlo así era la facilidad y sencillez del proceso para ser explicado a nivel químico y la necesidad de ordenar los contenidos dentro de un proceso tan extenso para explicar como puede ser el de la fotosíntesis. En su opinión la fotosíntesis es un proceso complejo, que cuesta bastante a los estudiantes, por eso justifican explicar la síntesis de la glucosa para trabajar el proceso de fotosíntesis en profundidad, todas las enzimas, los fotosistemas, todos los factores que afectan y hacer problemas. Una vez comprendida la fotosíntesis de los azúcares se trabajan la asimilación de minerales como procesos relacionados.

Pregunta 5. Las raíces son la boca de las plantas. (Nombrada en el gráfico 4.1 como: “Raíces boca”)

Como ya ha sido explicado anteriormente, esta idea proviene de Aristóteles y se ha mantenido en el tiempo a causa de una tendencia a utilizar el modelo animal para las explicaciones fisiológicas, como la respiración o la nutrición y la visión antropomórfica de los procesos biológicos. De esta manera los alumnos tienden a solapar el modelo animal sobre el vegetal para darle sentido a lo que saben. Por ejemplo llegan a la conclusión de que las raíces son la boca de las plantas, por lo que entienden que las plantas comen tierra (Cañal, 1990; Cañal, 2004; Köse, 2008).

Aunque en principio pueda parecer un recurso útil para la enseñanza, el utilizar comparaciones como esta provoca ideas equivocadas que después perduran en el tiempo. Incluso muchos profesores han mostrado su simpatía hacia este recurso didáctico, considerando ingenioso y efectivo para hacer comprender un modelo más desconocido para los estudiantes, como puede ser el vegetal. Muchos consideran que se podría decir que, desde cierto punto de vista y sin ponerse demasiado exigente, no es erróneo decir que las raíces son las bocas de las plantas. Al respecto

habría que resaltar el carácter erróneo de esta idea ya que, para empezar, las plantas toman del medio también CO_2 a través de las hojas, y no por ello considera nadie que las hojas sean bocas también. Pero, además de esto, y mucho más importante, la educación en ciencias debería tener como principal objetivo, por encima del aprendizaje de conceptos científicos, el desarrollo de una mente abierta a preguntas para la comprensión del medio natural. Este tipo de recursos pedagógicos mediante los cuales se comparan modelos restringen el conocimiento y lo encorsetan en vez de expandirlo. La idea debería ser abrir las miras de los alumnos, no importa la edad, hacia la variedad de formas de la Naturaleza y no llevarles a creer que existe un modelo patrón sobre el que se rigen los seres vivos.

A este respecto solo el 58,77 % de los encuestados consideran errónea esta idea. Es importante insistir en que a pesar de lo que pueda parecer, solapar el modelo vegetal sobre el modelo animal es un error muy importante, ya que hierra de base. Las plantas no tienen boca, ni ojos, ni estómago, ni corazón... al igual que los animales no tenemos hojas, ni raíces y, fuera de la poesía y el arte, es absurdo buscar estas estructuras en unos y en otros. Tenemos modelos anatómicos diferentes y esa idea es mucho más importante para que se lleven los estudiantes que saberse los nombres de las diferentes estructuras.

Así, de este análisis podríamos deducir que más del 40% de los futuros profesores consideran correcto este símil como recurso para explicar las partes de las plantas cormófitas y sus funciones.

Pregunta 6. La fotosíntesis se realiza por el día y la respiración, en cambio, por la noche. (Nombrada en el gráfico 4.1 como: “Día y noche”)

La fotosíntesis y la respiración no tienen las mismas funciones. Mediante la fotosíntesis, las plantas generan los componentes orgánicos que precisan para generar sus estructuras y mantener su homeostasis. En cambio, el objetivo del proceso de la respiración celular es el de obtener energía en forma de ATP para realizar todas las funciones necesarias para la vida del organismo. Así pues, cuando un organismo está realizando uno, no tiene que paralizarse el otro. Es cierto que como el proceso fotosintético requiere de luz para llevarse a cabo, en la mayoría de las plantas, solo tiene lugar durante el día. Sin embargo, la respiración celular se lleva a cabo tanto por el día como por la noche. Creer que ambos procesos se relacionan de manera que uno paraliza al otro, o que son procesos contrarios, o que la fotosíntesis es un tipo de respiración propio de las plantas, son errores conceptuales muy presentes en los estudiantes de Secundaria, pero que casi un tercio (el 29,82%) de los futuros profesores de Secundaria y Bachillerato lo crean así es un problema grave que hace que resulte sencillo comprender por qué los alumnos de estos niveles no llegan a comprender estos procesos correctamente.

- Preguntas tipo test multiopción: de la pregunta 7 a la 14

Estas últimas 8 preguntas son del tipo test con varias opciones, entre las cuales solo hay una considerada como correcta. Las 6 primeras preguntas (preguntas 7, 8, 9, 10, 11 y 12) tienen cuatro opciones, mientras que las dos últimas (preguntas 13 y 14) solo tienen tres opciones.

Pregunta 7. ¿Cuál es la finalidad de la fotosíntesis?

- A. Producir oxígeno.**
- B. Producir carbohidratos como la glucosa.**
- C. Producir todos los nutrientes orgánicos (carbohidratos, aminoácidos, ácidos grasos y bases nitrogenadas)**
- D. A y B son correctas.**

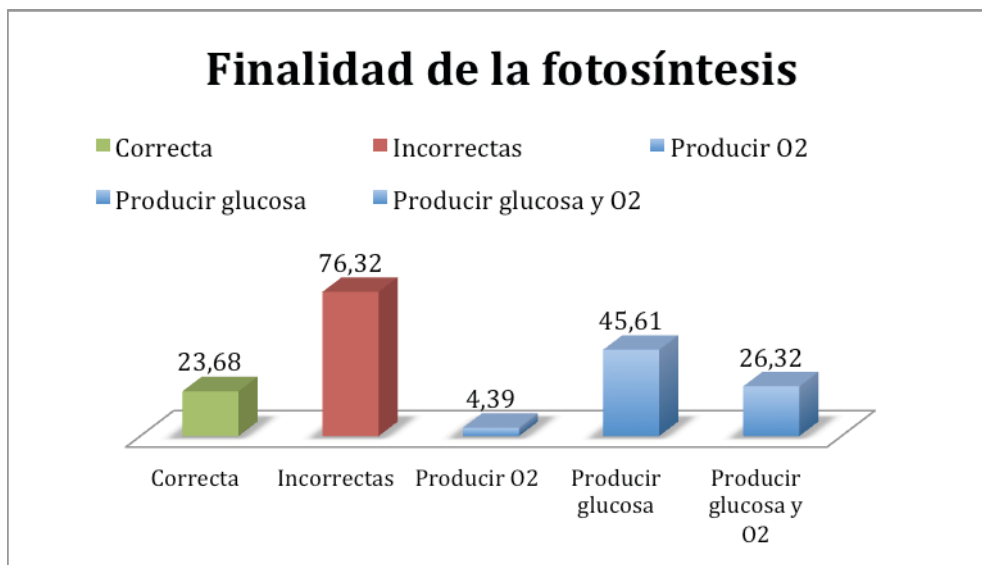


Gráfico 4.2. Pregunta 7: Finalidad de la fotosíntesis. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas.

Como ocurría en la pregunta 4, en la que se analizaba si los encuestados consideraban la síntesis de aminoácidos dentro del proceso fotosintético, esta pregunta se puede considerar como una de las más conflictivas de este estudio porque depende del especialista que la analice, del libro que se consulte e, incluso, del apartado que se lea dentro de un mismo libro, pueden aparecer respuestas diferentes. Sin embargo, en esta tesis ya se han presentado las ventajas de incluir la síntesis de todas las moléculas orgánicas dentro del proceso.

Lo cierto es que dentro de la visión tradicional de la fotosíntesis, esta se ha dividido en dos fases, con nombres más o menos acertados dependiendo de quien lo analice. Para no provocar posibles discusiones, podríamos hablar de una fase dependiente de luz, puramente fotosintética, en la que

se utiliza la energía lumínica como fuente para producir moléculas de ATP y poder reductor, y otra puramente metabólica e independiente de luz, en la que no participa ninguna fuente de energía externa, sino que se utiliza ese ATP y ese poder reductor, obtenidos en la fase dependiente de luz, para sintetizar moléculas más complejas (orgánicas) a partir de otras mucho más sencillas (moléculas inorgánicas, incluidas las sales minerales). A esa primera fase dependiente de luz se la ha llamado tradicionalmente *fase lumínica*, y a aquella que utiliza los productos obtenidos en esta, *fase oscura*. Pero lo cierto es que hoy en día se tiende a desterrar estos dos nombres, sobre todo el de *fase oscura*, puesto que parece decir que una fase ocurre con luz, por el día y la otra por la noche, sin luz. Cuando lo cierto es que ambas se dan de día, solo que una es dependiente de la luz y la otra independiente de la luz.

Hay quien puede preferir considerar que el proceso fotosintético acaba con la producción de ATP y poder reductor gracias a la energía lumínica; dicho de otra manera, considerar la fotosíntesis solo a la fase dependiente de luz con el argumento de que es la fase estrictamente “fotosintética”. De esta manera dejarían fuera de la fotosíntesis la fase puramente metabólica, independiente de luz en la que se usa ese poder reductor y esa energía en forma de ATP en la producción de moléculas orgánicas a partir de otras moléculas inorgánicas. Este planteamiento no incurre en ninguna incoherencia. Así pues, considerar ambas “fases” dentro de la fotosíntesis o no es un hecho meramente conceptual.

Sin embargo, bajo el punto de vista didáctico, consideramos más útil la visión de que la fotosíntesis consta de estas dos fases ya que, con esta opción, no se pierde de vista nunca la finalidad del proceso, ni el papel de los productores dentro de las cadenas tróficas. Al incluir ambas fases, el concepto es más integrador y se puede relacionar con una mayor facilidad con otros conceptos u otros campos de las ciencias naturales. Mientras que la visión en la que la fotosíntesis llega hasta la conversión de energía

lumínica en química y poder reductor, deja al concepto de fotosíntesis, en sí mismo, carente de un objetivo mayor y le hace perder su enorme valor como pieza clave en el reciclado de la materia.

En cualquier caso, lo que no debe admitirse es una mezcla de los dos, puesto que incurre en una incoherencia de base y, además, carece de un verdadero sentido pedagógico. Si se quiere considerar que mediante el proceso fotosintético se transforma la energía lumínica en energía química, que después, junto con el poder reductor, se utilizará para diferentes rutas anabólicas, perfecto. Y si se quiere considerar que la síntesis de esas moléculas forma parte de la fotosíntesis, perfecto también. Lo que no se comprende es que se considere dentro del proceso fotosintético solo una parte de todos los componentes orgánicos que se obtienen a partir de las moléculas inorgánicas obtenidas desde el medio externo, y del ATP del y poder reductor obtenidos en la fase dependiente de luz. ¿Por qué solo considerar proceso fotosintético a la producción de azúcares como la glucosa, si su síntesis requiere de las mismas moléculas de ATP y poder reductor que los aminoácidos, por ejemplo?

Analizando ahora los resultados obtenidos en esta pregunta del cuestionario con los alumnos que cursaban el Máster de Formación del Profesorado en la especialidad de Biología y Geología, nos encontramos que solo el 23,68% de los encuestados consideran que mediante la fotosíntesis se obtengan todos los componentes orgánicos que la planta fabrica. Teniendo en cuenta que esta visión no es la que hemos encontrado en los libros de una forma clara, sino, como ya se ha expuesto, en los manuales de fisiología vegetal se presenta de una manera más bien residual o secundaria, no resulta llamativo que solo este porcentaje de los encuestados lo consideren así. Se acerca a lo esperado que el 71,93% (entre los que contestan la opción única, B, y los que consideran la opción combinada, D) considere que las únicas moléculas orgánicas que se obtienen sean los azúcares.

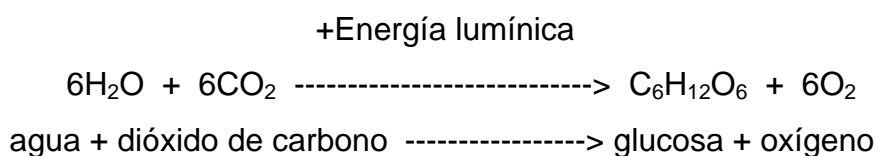
Lo que sí que merece especial atención es el hecho de que el 30,71% de los futuros profesores de Secundaria y Bachillerato consideren que la producción de oxígeno molecular por parte de las plantas durante la fotosíntesis es su objetivo. De este 30,71% el 26,32%, al menos, considera que también tiene como finalidad la producción de glucosa. Pero el 4,39% ha considerado que el único objetivo de la fotosíntesis es el de producir oxígeno. Esto sí puede considerarse un error de base importante desde diferentes puntos de vista. El primero porque muestra un desconocimiento profundo del proceso en sí mismo, pero también porque muestra una enorme desconexión sobre el funcionamiento de la Naturaleza al considerar un desecho metabólico de un ser vivo como una finalidad en sí mismo. ¿Para qué un ser vivo realizaría un proceso, con todo lo que ello conlleva de recursos, maquinaria celular y energía, para producir un compuesto que se expulsa al medio? La idea de que la finalidad de la fotosíntesis es la producción de oxígeno, tan presente en los niveles escolares, la considerábamos erradicada en los niveles universitarios, sin embargo ha sido una sorpresa encontrarla, incluso en los niveles de posgrado, en aquellas personas que se están formando para impartir clases de biología.

Pregunta 8. ¿Para qué sirven las sales minerales como los nitratos y sulfatos?

- A. Como cofactores de las reacciones de oxido-reducción.**
- B. Como sustratos que reducir hasta componentes orgánicos en el proceso fotosintético.**
- C. Para formar parte de los fotosistemas.**
- D. Para que funcionen las bombas y los diferentes transportes de las células.**

Ya se ha analizado lo que Cañal llama el *eclipse de las sales minerales* (Cañal, 2005, pag. 47) en el cual los libros presentan dibujos sobre la

fotosíntesis en los que incluyen a las sales minerales siendo absorbidas por las raíces o explican los mecanismos de entrada de las sales minerales a través de las células epidérmicas de las raíces y su transporte hasta los vasos leñosos para formar la savia bruta, pero cuando describen la fotosíntesis en términos químicos, desaparecen completamente de la ecuación, la cual adquiere la forma, ya expuesta anteriormente:



Esto puede entenderse por todo lo descrito en la pregunta anterior. Si seguimos insistiendo en considerar que el único objetivo de la fotosíntesis es la producción de glúcidos, en especial, de glucosa, no hay cabida para las sales minerales, puesto que estas son necesarias como aporte del resto de los bioelementos principales para la síntesis del resto de biomoléculas diferentes a los glúcidos, que solo poseen carbono, hidrógeno y oxígeno en su composición, por lo general.

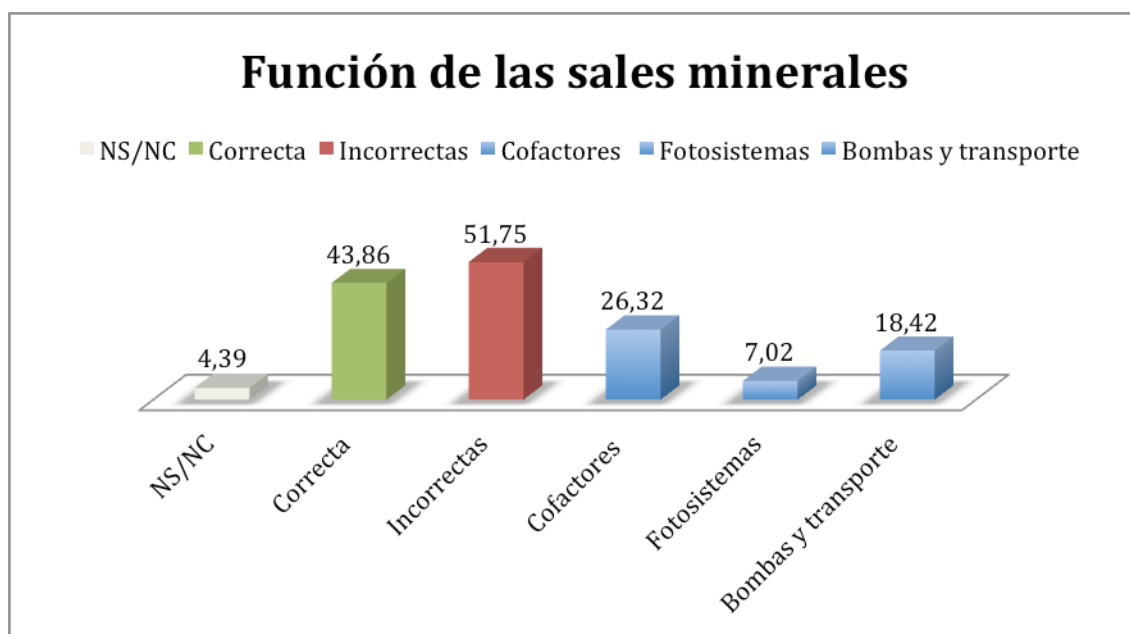


Gráfico 4.3. Pregunta 8: Función de las sales minerales. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas.

Como esta es la parte más desconocida y conflictiva, no es de extrañar que esta sea la pregunta que acumula el mayor porcentaje de encuestados que no contestan, dejándola en blanco, siendo estos el 4,39%.

Sin embargo, resulta muy llamativo que, a diferencia de lo que ocurre en la pregunta anterior, aquí hay un porcentaje de acierto mucho mayor. El 43,86% de los estudiantes del Máster han considerado que las sales minerales sirven como sustratos a reducir a componentes orgánicos mediante la fotosíntesis. Del 51,75% restante que no acierta en la respuesta, la mayoría, el 26,32% creen que las sales minerales sirven como cofactores para que funcionen las reacciones de oxido-reducción, el 18,42% creen que su función es que las bombas y los transportadores de membrana funcionen correctamente y el 7,02% las consideran un componente de los fotosistemas.

El suceso que aquí se pone de manifiesto, en el que vemos que los porcentajes de aciertos y fallos en preguntas que hablan, más o menos, de lo mismo, sean tan diferentes, se analizará más adelante (apartado 4.2.2).

Pregunta 9. ¿Qué es el CO₂ para las plantas?

- A. El gas que usan en el proceso de la respiración.**
- B. Un alimento esencial.**
- C. Un gas inútil que expulsan por los estomas.**
- D. El compuesto que transforman en oxígeno en el proceso de fotosíntesis.**

Cuando se explicó el cuestionario y sus repuestas en el capítulo 3, Metodología de estudio, se expuso la enorme problemática que existe alrededor de los conceptos de nutrición y alimentación, así como de los conceptos de nutriente y alimento.

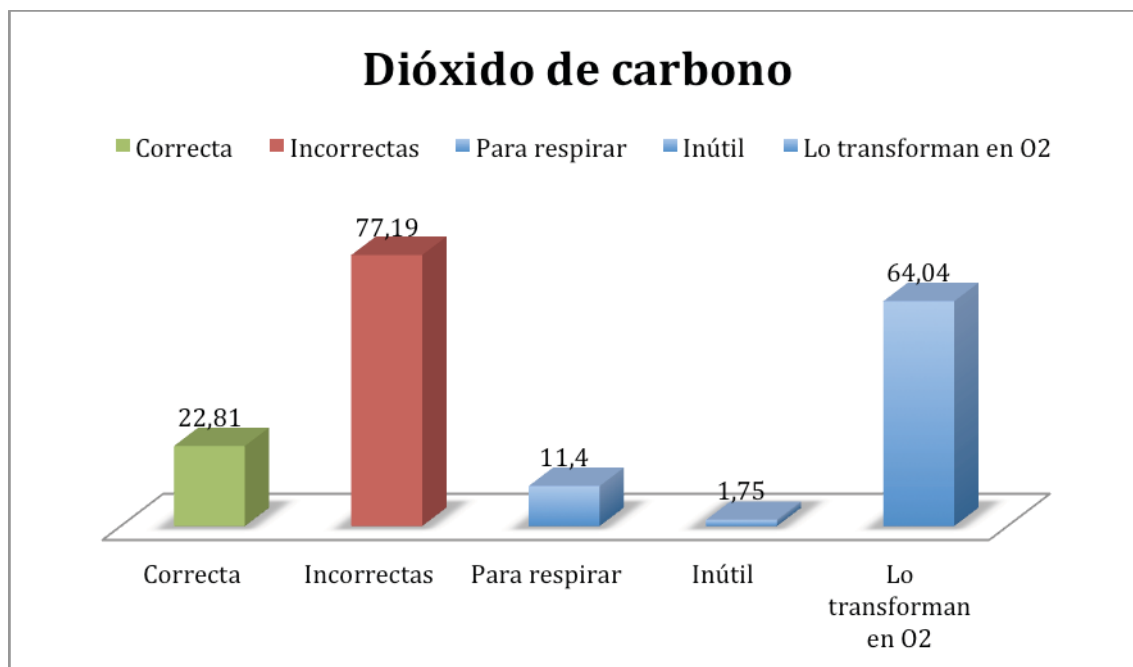


Gráfico 4.4. Pregunta 9: Qué es el CO₂. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas.

A pesar de las enormes incongruencias a este respecto, la concepción sobre alimentación más aceptada hoy en día podría ser la que la considera como la fase inicial de la nutrición. Dicho de otra manera, es aquella fase en la que los organismos introducen sustancias del medio (alimentos), para usarlas después en el proceso de nutrición. Sin embargo, la consideración más frecuente es que los alimentos son solo sustancias sólidas o líquidas, por lo que las sustancias gaseosas como el dióxido de carbono, el oxígeno o el nitrógeno, no serían considerados alimentos. Por supuesto, a nivel molecular y químico, esta discriminación de las sustancias gaseosas no tiene ninguna base. El motivo parece deberse más a razones históricas y a tratar de evitar la confrontación con el lenguaje cotidiano (Cañal, 2005).

Otro problema a la hora de considerar al CO₂ como un alimento sería la idea de que los alimentos deben ser de gran tamaño, ya que de ellos, y mediante un proceso de digestión, van a ser extraídos los nutrientes. De nuevo, entendemos que esta concepción se basa más en el uso cotidiano, ya que éste se emplea solo para seres humanos u otros animales domésticos. Así, el concepto de alimentación se asocia en muchas

ocasiones solo a animales que toman del medio sustancias mediante procesos muy semejantes a nosotros, los seres humanos. Solo aquellos animales con boca, que ingieren cuerpos grandes y los fragmentan después gracias a un tubo digestivo complejo se alimentarían. No lo harían, pues, los gusanos parásitos del tubo digestivo que absorben los nutrientes ya digeridos directamente por la piel; ni las arañas, puesto que la digestión ocurre fuera de su cuerpo; ni los hongos saprófitos que descomponen la materia orgánica mediante secreciones al medio y después absorben lo que necesitan; y, por supuesto, no lo hacen las plantas. Es comprensible que las palabras que se utilizan tan a menudo en ambientes cotidianos generen ciertas ideas en las personas no formadas en ciencias, pero no por ello las palabras deben dejar de servir a un concepto más general y amplio. Si la palabra alimento no sirve para nombrar aquellas moléculas o cuerpos que se introducen desde el medio y que se utilizan en el proceso de nutrición, claramente nos falta una palabra que abarque esta idea. En nuestra opinión, esa palabra debería ser *alimento* y bajo este punto de vista, el líquido que absorben por la piel los gusanos parásitos, el jugo que succionan las arañas procedente de sus víctimas digeridas fuera del cuerpo, las sustancias que absorben los hongos mientras realizan la descomposición de la materia orgánica y, por supuesto, el agua, las sales minerales y el dióxido de carbono que introducen las plantas desde el medio para después transformarlo en moléculas orgánicas, deberían ser considerados alimentos para estos organismos.

En cualquier caso, aunque los encuestados dudaran sobre la definición de alimento, la pregunta no dejaba otra opción que escoger esa respuesta, ya que las otras son claramente falsas. Sin embargo, nos encontramos con que el 64,04% considera que el CO_2 es el gas que transforman en O_2 mediante el proceso de fotosíntesis, respuesta que denota una laguna muy clara en conocimientos acerca de la fotosíntesis, e, incluso, sobre la respiración celular, donde, a partir del oxígeno, se forma agua, ya que sirve como aceptor final de electrones en la cadena respiratoria. Igualmente

pasa en el proceso fotosintético en el cual el oxígeno se libera al medio como producto de desecho de la hidrólisis del agua.

Aparte hemos encontrado que el 11,4% de los encuestados consideran que la plantas realizan el proceso de respiración con el dióxido de carbono, mostrando que la idea de que la fotosíntesis es una especie de “respiración de las plantas” sigue presente en niveles tan altos y especializados como el de los encuestados. Como ya se ha comentado, esta idea alternativa y errónea es una de las más presentes en los estudiantes (Maskill & Cachapuz, 1989; Thomas & Silk, 1990; Hazel & Prosser, 1994; Abdullah & Scaife, 1997; Prokop & Fancovicová, 2006; Çepni & Keleş, 2006; Marmaroti & Galanopoulou, 2006; Yenilmez & Tekkaya, 2006; Köse, 2008), y parece difícil de erradicar, cuando más del 10% de los futuros profesores de biología de los niveles de Secundaria y Bachillerato también lo creen así. Por otro lado, solo el 1,75% de los encuestados han considerado al CO₂ como un gas inútil para las plantas. Aunque sea una respuesta que denota un desconocimiento muy profundo, lo cierto es que ese porcentaje podemos considerarlo poco significativo.

Pregunta 10. Sobre las células de las plantas, ¿cuál de estas afirmaciones es correcta?

- A. Todas las células de las plantas son células vegetales, tienen cloroplastos y metabolismo autótrofo.**
- B. No todas las células de las plantas tienen cloroplastos, por lo tanto, estas células sin cloroplastos tienen un metabolismo heterótrofo.**
- C. Todas las células de las plantas tienen metabolismo autótrofo pero no todas tienen cloroplastos.**
- D. Todas las células de las plantas tienen metabolismo autótrofo excepto las de las plantas carnívoras.**

Es cierto que esta puede ser una de las preguntas más complicadas y liosas para los encuestados, por su formulación, más extensa que el resto de las cuestiones. Sin embargo, si se lee con atención, la pregunta solo deja una posible respuesta como verdadera, ya que el resto de opciones son claramente falsas. La opción A propone que todas las células vegetales poseen cloroplastos, cuando en el aula se insiste constantemente en que solo las “partes verdes” tienen cloroplastos, puesto que son estos los que poseen un pigmento de color verde llamado clorofila, que sirve para absorber la luz solar. Se insiste mucho en que, por ejemplo, las raíces no poseen cloroplastos puesto que están bajo tierra y no pueden realizar la fotosíntesis. Esta idea, no solo se trabaja en Secundaria, sino que ya está presente en los niveles de Primaria. Tanto es así que cuando los alumnos llegan a 1º de la ESO y se trabajan los conocimientos previos de este tema, la mayoría contestan correctamente a esta cuestión. Por lo tanto, es muy sorprendente encontrar que el 27,19%, más de un cuarto de los encuestados, todos licenciados o graduados en Ciencias marquen la opción de que todas las células vegetales poseen cloroplastos.

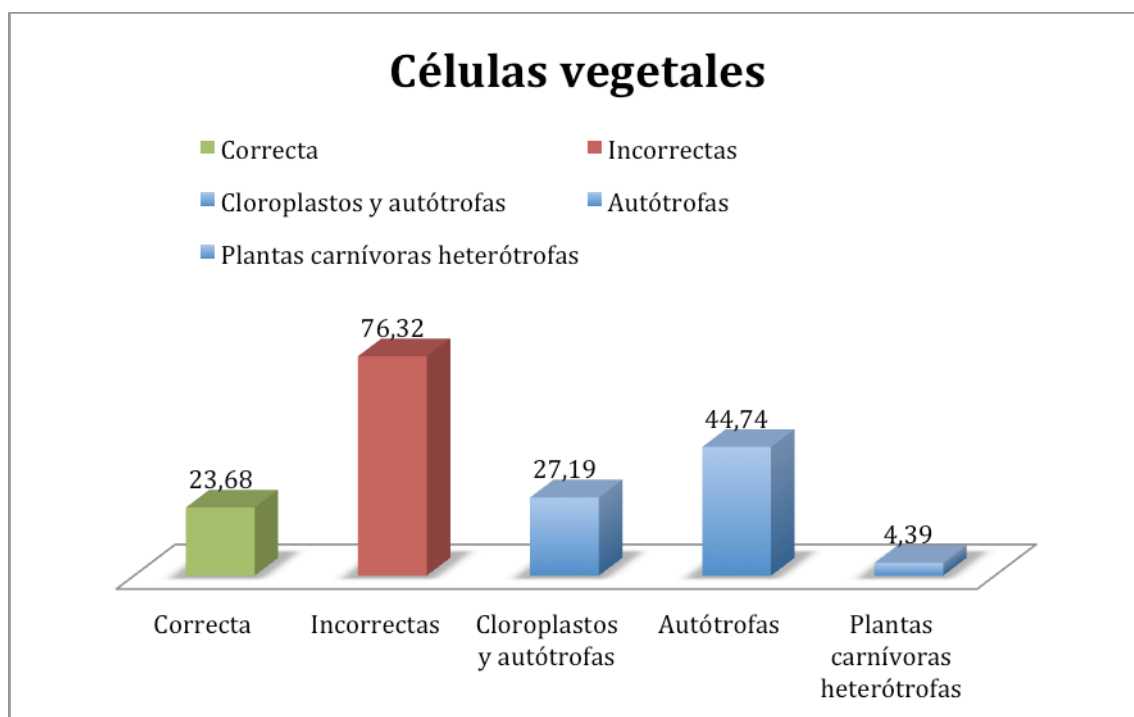


Gráfico 4.5. Pregunta 10: Las células vegetales. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas.

Los conceptos *autótrofo* y *heterótrofo* suelen, y deben, aplicarse a organismos, puesto que, precisamente en esta cuestión, vemos que las células de los organismos pluricelulares que poseen tejidos y, por lo tanto, diferenciación celular, pueden ser muy diferentes unas de otras. Esto es lo más normal, ya que cada tejido se especializa en funciones diferentes y, por este motivo, las células pueden ver su estructura muy modificada. Una célula tan especializada como un glóbulo rojo humano carece hasta de núcleo y, por consiguiente, de ADN. Así vemos que las células de las raíces de las plantas, las de los vasos conductores y las de los pétalos de las flores, entre otras, carecen completamente de cloroplastos, ya que su función no está relacionada con la fotosíntesis. De esta manera, las células de estos tejidos necesitan los compuestos orgánicos sintetizados en las células fotosintéticas de otras partes de la planta para obtener los nutrientes necesarios para generar y reparar sus estructuras, obtener energía y regular sus procesos. Aunque en el momento en el que las plantas, como organismo, son capaces de sintetizar la materia orgánica que precisan para su nutrición, aunque solo sea en ciertos tejidos, son consideradas como organismos autótrofos. Sin embargo solo las células que posean cloroplastos y que realicen la fotosíntesis poseerán un metabolismo autótrofo, mientras que aquellas que requieran de los compuestos orgánicos producidos por los tejidos fotosintéticos tendrán, por definición, un metabolismo heterótrofo. Así pues se puede considerar una contradicción la idea expresada en la opción C que dice que todas las células de las plantas tienen metabolismo autótrofo pero no todas tienen cloroplastos. Sin embargo, ha sido la opción más escogida, representando el 44,74% de los encuestados.

Solo el 23,68% de los alumnos del Máster consideran la posibilidad de que aquellas células de las plantas que no poseen cloroplastos tengan un metabolismo heterótrofo. El 4,39% restante optó por la idea de que todas

las células de las plantas tienen metabolismo autótrofo excepto las de las plantas carnívoras, que por lo que vemos, en general, les resulta una idea con poca base.

Pregunta 11: Sobre la fotosíntesis y la respiración, ¿cuál de estas afirmaciones es correcta?

- A. Las plantas no necesitan respirar cuando hay luz porque ya obtienen la energía que necesitan de las reacciones fotosintéticas, por lo tanto solo respiran por la noche.
- B. La fotosíntesis es el proceso contrario a la respiración al ser el proceso productor de oxígeno y consumidor de CO₂.
- C. A y B son incorrectas.
- D. A y B son correctas.

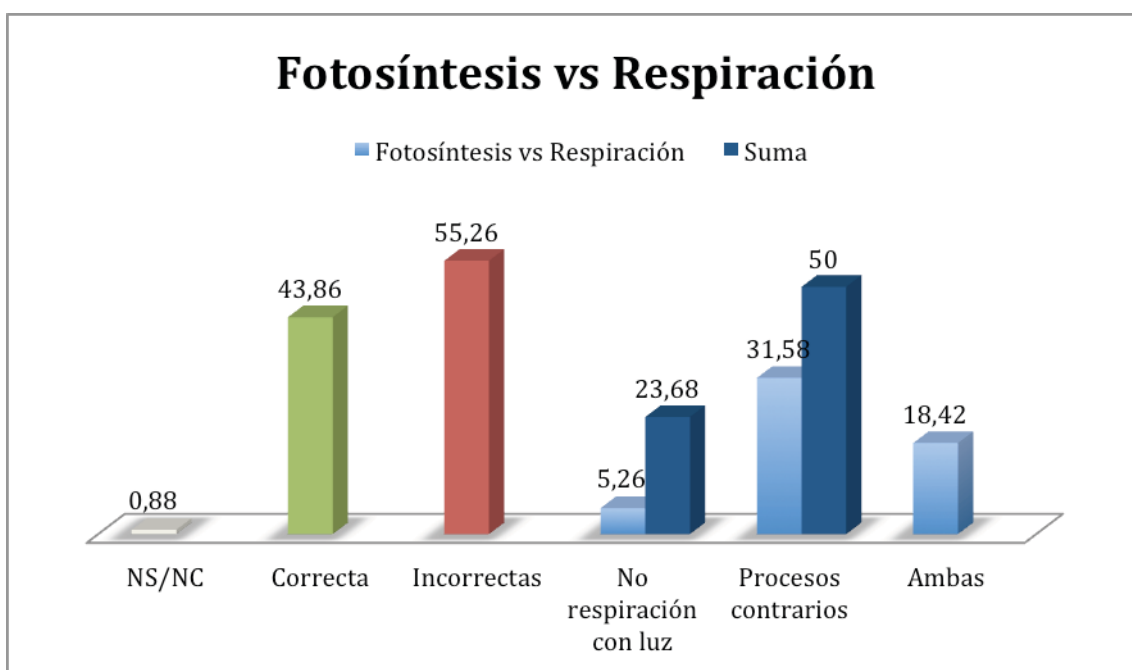


Gráfico 4.6. Pregunta 11: Fotosíntesis vs Respiración. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas.

Con esta pregunta se puede comprobar que casi un cuarto de los futuros profesores de Secundaria (el 23,68%) creen la respiración celular y la fotosíntesis tienen la misma función para los seres vivos: la obtención de

energía. De nuevo, nos hemos encontrado con un error de base muy grave, que no implica conceptos de fisiología, ni de bioquímica avanzados, sino de conceptos muy básicos sin los cuales no habría cómo explicar el proceso de fotosíntesis en el aula a estudiantes de ningún nivel académico.

Tan importante y tan grave como la concepción anterior sobre la fotosíntesis es la de que es el proceso contrario a la respiración que defienden el 50% de los encuestados.

Hay un 18,42% de los futuros profesores de biología que consideran ambas ideas correctas. Consideran a la fotosíntesis el proceso contrario a la respiración y, además, consideran que cuando se realiza la fotosíntesis, no es necesario que las plantas realicen la respiración puesto que ya obtienen la energía que necesitan de ahí. No llegamos a comprender cómo llegan a creer que ambos procesos pueden tener la misma finalidad, de manera que cuando uno está activo, no es necesario que se dé el otro; y, a la vez, puedan ser procesos contrarios. Ambas ideas son claramente contradictorias y, sin embargo, casi un quinto de los encuestados la elige como su opción correcta. Solo el 43,86% de los alumnos del Máster consideran ambas ideas como falsas. Aunque comparado con los resultados obtenidos en otras preguntas pueda parecer una cifra alta, no lo es, en absoluto. No es admisible que menos de la mitad de las personas que algún día explicarán la fotosíntesis sepan que estas dos ideas no son correctas.

Pregunta 12: ¿Qué significa que las plantas tengan nutrición autótrofa?

- A. Que no tienen los mismos requerimientos nutricionales que los animales.
- B. Que no necesitan los nutrientes orgánicos para crecer y desarrollarse, sólo necesitan nutrientes inorgánicos.
- C. A y B son incorrectas.
- D. A y B son correctas.

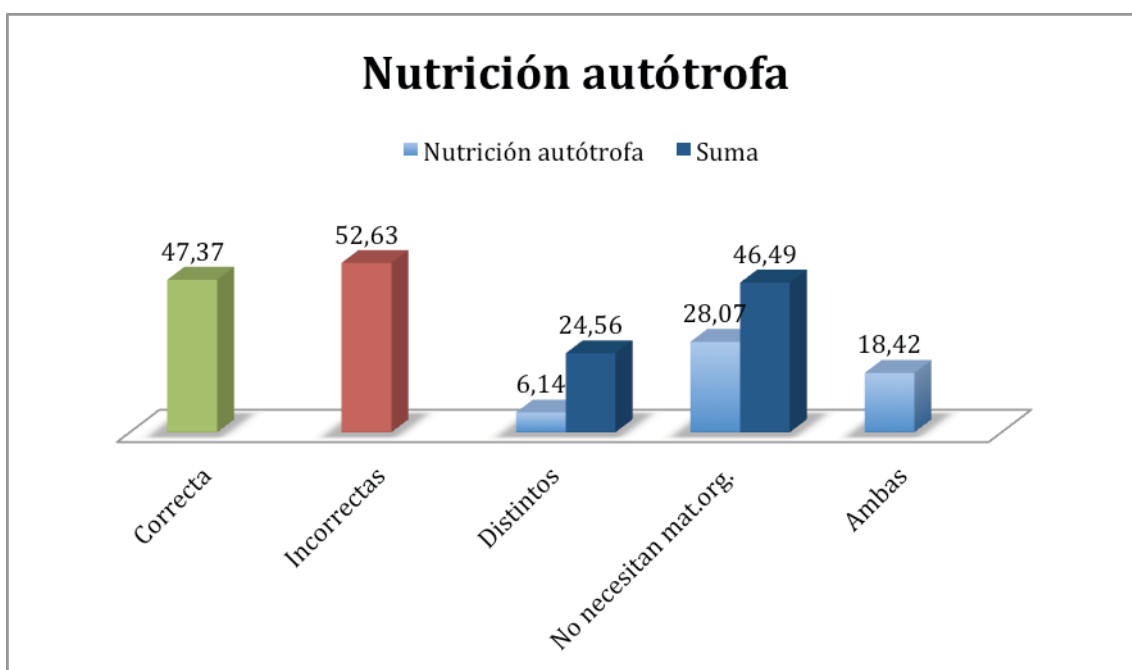


Gráfico 4.7. Pregunta 12: La nutrición autótrofa. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas.

En esta pregunta se observan resultados parecidos a los de la pregunta anterior. Encontramos que el 47,37% de los encuestados responden correctamente, considerando ambas afirmaciones como falsas, mientras que un 18,42% han considerado ambas ideas como verdaderas.

Aparte, nos encontramos que, en total (entre la opción B y la opción D), hay un 46,49% que creen que los seres autótrofos no necesitan nutrientes orgánicos para crecer y desarrollarse; y un 24,56% que consideran que ser

autótrofo significa no tener los mismos requerimientos nutricionales que los seres heterótrofos, como los animales. Como ya se ha explicado, ambas respuestas son erróneas de base, ya que, a nivel molecular, todos los seres vivos somos muy parecidos; nuestras células están formadas de las mismas biomoléculas: glúcidos, lípidos, proteínas (o aminoácidos) y ácidos nucleicos. Este tema se trabaja en profundidad en 3º de la ESO según manda la Ley de Educación LOMCE, al igual que se hacía con la anterior LOE. Por lo tanto estos conceptos tan básicos debe dominarlos a la perfección cualquier profesor de Secundaria.

Sin embargo, en esta cuestión, las opciones A y B no son incompatibles, como en el caso anterior, sino todo lo contrario. En la pregunta anterior, lo extraño era encontrar cierto porcentaje que considerara verdaderas las dos respuestas, sin embargo aquí, existe una relación clara entre las dos opciones y no se entiende que haya un 28,07% de los encuestados que respondan que los organismos autótrofos no necesitan nutrientes orgánicos pero no consideren que estos organismos tienen diferentes requerimientos nutricionales a los de los heterótrofos. ¿Qué están diciendo con eso? ¿qué los heterótrofos tampoco los necesitamos? Lo que observamos es una incoherencia muy llamativa en un porcentaje bastante alto de alumnos encuestados. También hay un 6,14% que consideran que tenemos requerimientos nutricionales diferentes pero que defienden que los autótrofos sí necesitan materia orgánica para su desarrollo. Lo que desconocemos es a qué requerimientos nutricionales se refieren.

Pregunta 13: ¿Cuál es el destino de la savia bruta?

- A. Las hojas**
- B. Las raíces**
- C. Todas las células**

Las dos últimas preguntas acerca del destino de la savia bruta y de la savia elaborada están muy relacionadas y se preguntan para poner de manifiesto

otro error muy común, presente en los estudiantes y, sobre todo, en los libros de texto de los niveles de Primaria, de Secundaria e, incluso, de Bachillerato. En los manuales especializados en fisiología vegetal, el tema del transporte de los compuestos absorbidos y producidos se trabaja en tanta profundidad que esta idea tan simplista no parece encontrarse de forma clara.

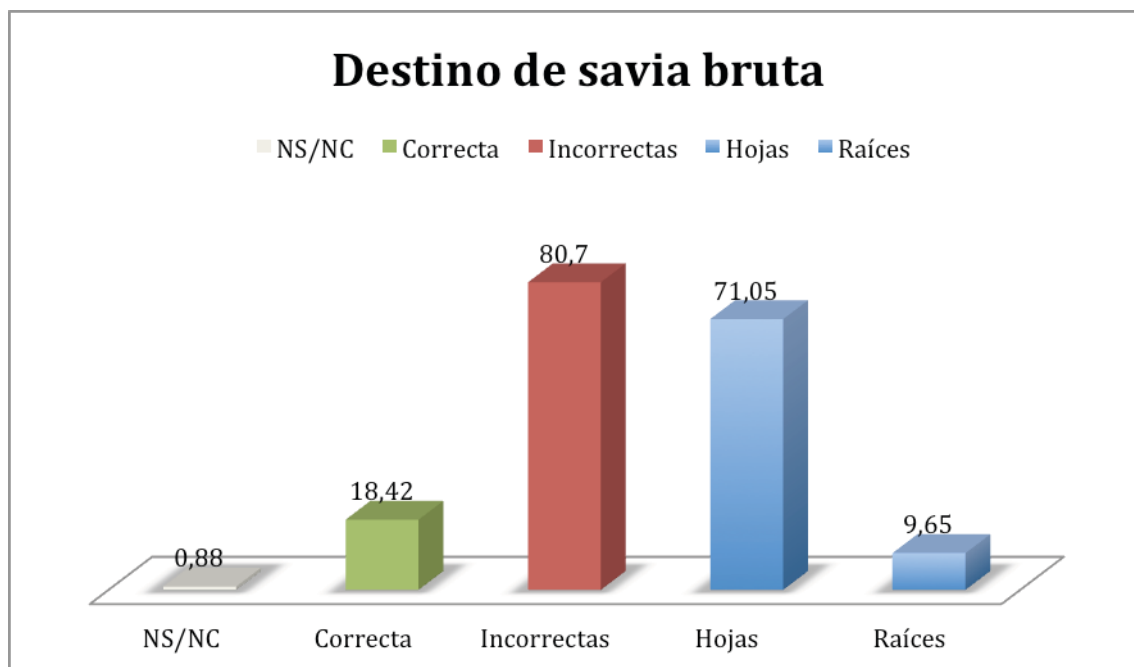


Gráfico 4.8. Pregunta 13: La savia bruta. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas.

El error más claro y persistente lo vamos a encontrar en el destino de la savia bruta, ya que, como se ha comentado, esta idea se encuentra muy presente y remarcada como idea clave para la comprensión del proceso general de la nutrición vegetal, en los libros de texto.

La idea principal que se defiende en estos textos es que la savia bruta, compuesta por el agua y las sales minerales que la planta absorbe por las raíces, son transportadas hasta las hojas (partes fotosintéticas) para ser transformados, junto con el dióxido de carbono absorbido por los estomas, en azúcares gracias a la luz solar. El problema de esta afirmación es que,

una vez más, olvidamos por completo que todas las células, por norma general, necesitan los mismos compuestos para realizar sus funciones y para mantener su homeostasis. En ocasiones se nos olvida que todas las células poseen agua en su citoplasma y en el interior de los orgánulos membranosos, así como su enorme necesidad de iones provenientes de las sales para que funcionen los transportadores de membrana, sin ir más lejos. Así pues, las plantas toman por las raíces el agua y las sales minerales que necesitan para cubrir las necesidades de todas sus células además de las que necesitan para realizar el proceso fotosintético y transformar en componentes orgánicos.

A pesar del carácter enormemente básico de este concepto, esta es una idea tan repetida y remarcada como idea clave dentro de la nutrición de las plantas, que solo el 18,42% de los encuestados la contestaran correctamente. El 71,05% es de la opinión de que el único destino de la savia bruta son las hojas, olvidando así, incluso, que la mayoría de las plantas tienen otros tejidos fotosintéticos además de las hojas.

Además hemos obtenido casi un 10% de encuestados (9,65% concretamente) que han respondido que el destino de la savia bruta son las raíces, por lo que deducimos que han confundido ambos conceptos. Si hubiera sido uno o dos, podríamos considerarlo despiste, pero el 9,65% es un porcentaje bastante alto para algo tan básico como los conceptos de *savia bruta* y *savia elaborada* que se trabajan desde los niveles de Primaria.

Pregunta 14: ¿Cuál es el destino de la savia elaborada?

- A. Las hojas**
- B. Las raíces**
- C. Todas las células**

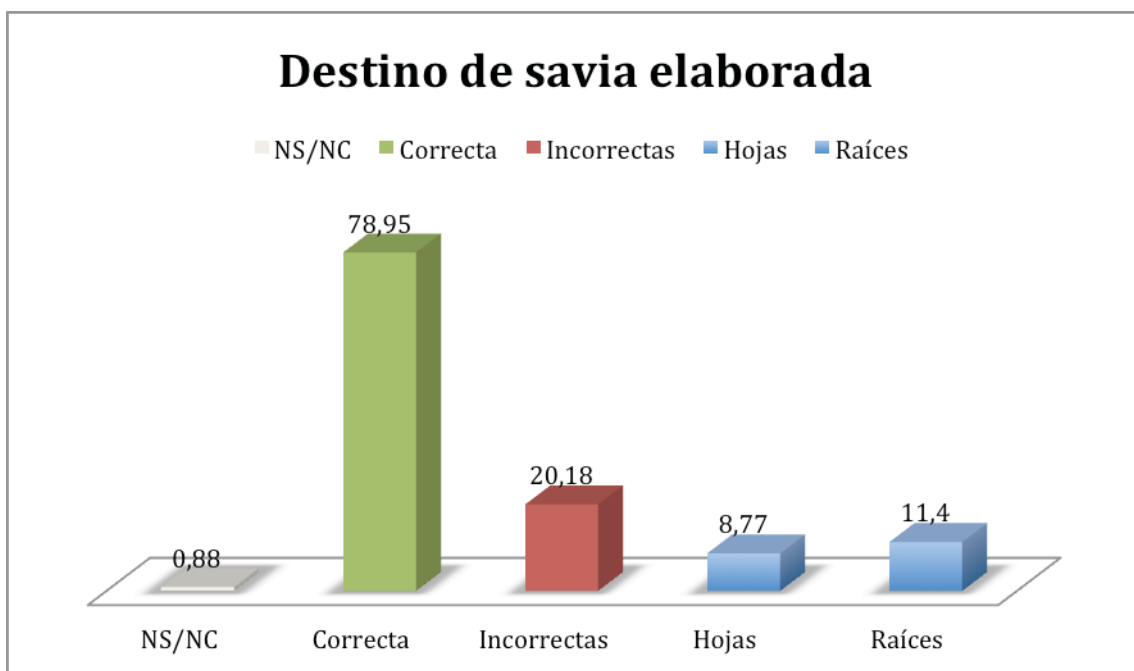


Gráfico 4.9. Pregunta 14: La savia elaborada. Porcentaje de acierto, de error y de respuestas erróneas alternativas.

Esta pregunta tiene el porcentaje de acierto más alto de esta parte y el segundo más alto de todo el cuestionario. La razón vuelve a ser la misma que en la pregunta anterior. Estos conceptos se trabajan desde los niveles de Primaria y se hace mucho hincapié en ellos. Solo que, a diferencia de la pregunta anterior, en este caso, en los libros de texto se insiste mucho en la idea que consideramos correcta: el destino de la savia elaborada son todas las células de la planta, ya que todas las células necesitan esos nutrientes orgánicos que han sido fabricados en las células fotosintéticas.

No deja de sorprender, en cambio, que el 8,77% de los estudiantes encuestados crea que el destino de la savia elaborada son las hojas y que el 11,4% responda que los compuestos de la savia elaborada solo son necesarios en las células de las raíces. En el caso de los primeros pueden haber confundido ambos términos, pero los segundos sí saben lo que es la savia elaborada y creen que al igual que las raíces toman del medio lo que necesitan las hojas y por eso se transporta hasta allí,

las hojas fabrican lo que se necesita en las raíces. Una idea simplista y errónea con unas raíces tan profundas que resulta casi imposible imaginar cómo podrán estas personas enseñar el proceso de nutrición vegetal a los alumnos de Secundaria y Bachillerato.

4.2.2. Análisis de la relación en los resultados de preguntas vinculadas

Independientemente de si tienen bien o mal las repuestas, hemos comprobado que algunos encuestados responden de forma diferente acerca del mismo concepto según la pregunta. Esto denota, claramente, la ausencia de un aprendizaje significativo acerca del tema sobre el que se pregunta. Contestan de memoria, lo que les suena, sin pararse a pensar si tiene sentido, y no se dan cuenta de que hace menos de 5 minutos han respondido lo contrario en una pregunta anterior. Podríamos considerar que esto es lo normal, que nos ocurre a todos, pero no podemos olvidar que son estudiantes del Máster de Formación del Profesorado en Secundaria y Bachillerato y que los cuestionarios se pasaron durante una de las clases de didáctica. Así, debemos suponer una actitud de interés sobre el tema que en pocos meses podrían estar impartiendo. Bajo esta perspectiva, podríamos considerar, incluso, más grave el hecho de que respondan de forma diferente dependiendo de la pregunta que el hecho de que desconozcan la respuesta correcta como docentes o futuros docentes; ya que hay una mayor probabilidad de que busquen la respuesta y pongan el remedio a algo que no saben que a algo que creen saber pero que saben mal.

Esto no es nada nuevo; mucho se ha escrito sobre el aprendizaje significativo y las consecuencias de su falta. Según la teoría de Ausubel (1983), un aprendizaje es significativo cuando los contenidos son relacionados de modo no arbitrario y sustancial (no al pie de la letra), de forma que las ideas se relacionan con algún aspecto existente específicamente relevante de la

estructura cognoscitiva del alumno, como una imagen, un símbolo ya significativo, un concepto o una proposición. Pero aunque descubrir que temas que consideramos aprendidos, realmente no tienen un aprendizaje significativo es muy común, sí debe resultar alarmante que en un tema que es considerado tan importante en la enseñanza de tantos países, entre ellos España, los propios licenciados o graduados que se están formando para ser profesores de biología y geología de Secundaria y Bachillerato, no se den cuenta de que, en realidad, no comprenden la nutrición vegetal.

Una de las cosas más importantes para un profesor es que haya integrado los conocimientos que explica, que los haya hechos suyos y los haya unido con las experiencias vitales que pueden conectarle a sus alumnos y resultar cercanas a ellos. Aún más, podríamos decir que la profundidad con la que conozca los diferentes conceptos es menos relevante que lo bien enlazados y relacionados que tenga esos conceptos, lo sólidos que sean; ya que la idea es ayudar y acompañar a los estudiantes a generar su propio pensamiento a través de la educación y eso no puede hacerse si nosotros mismos tenemos nuestro conocimiento poco consistente, poco formado, lleno de huecos y frágil.

El aumento de los conocimientos es algo que seguirá desarrollándose a lo largo de los años en los docentes según ejerzan la profesión, al buscar recursos, diseñar actividades e investigar sobre un tema que los estudiantes no entienden bien o, incluso, que se les queda corto porque lo entienden y les gusta. Pero ponerse frente a una clase a explicar conceptos sobre algo tan complejo y profundo como puede ser la organización y funcionamiento de la vida y de los procesos vitales, sin una base sólida y profunda de los conceptos más básicos, es un error importante. Un error que seguramente los alumnos pondrán de manifiesto, ya que sus preguntas son, a menudo, muy incisivas.

Pero, en cualquier caso, difícilmente podrá un profesor o profesora transmitir el pensamiento científico, los principios básicos de biología y las preguntas más

interesantes acerca de la vida y su funcionamiento, si él mismo o ella misma carece de este aprendizaje significativo.

Para realizar el análisis de las incoherencias encontradas en las respuestas hemos necesitado analizar el cuestionario de cada encuestado de forma independiente. Ya no interesa el porcentaje general de acierto o error de cada pregunta sino comprobar si una misma persona ha contestado ideas que podemos considerar contradictorias.

Las preguntas que hemos contrastado han sido las siguientes:

- Preguntas 4, 7 y 8. Todas hacen referencia al objetivo de la fotosíntesis de producir la materia orgánica que las plantas necesitan para crecer y llevar a cabo sus funciones vitales, y no solo la producción de glúcidos como la glucosa.
- Preguntas 13 y 14. La primera sobre el destino de la savia bruta y la segunda sobre el destino de la savia elaborada.

4.2.2.1. Relación entre las preguntas 4, 7 y 8: La síntesis de materia orgánica

Al comparar la pregunta 4 (Verdadero o falso: La síntesis de aminoácidos para formar proteínas forma parte del proceso fotosintético), con la pregunta 7 (¿Cuál es la finalidad de la fotosíntesis?) y con la pregunta 8 (¿Para qué sirven las sales minerales como los nitratos y sulfatos?) comprobamos que solo 4 alumnos, de los 114, (el 3,5%) tuvo las tres preguntas correctas. El resto de los encuestados que tuvieron alguna de estas preguntas bien, incurrió en alguna incoherencia si comparamos sus respuestas.

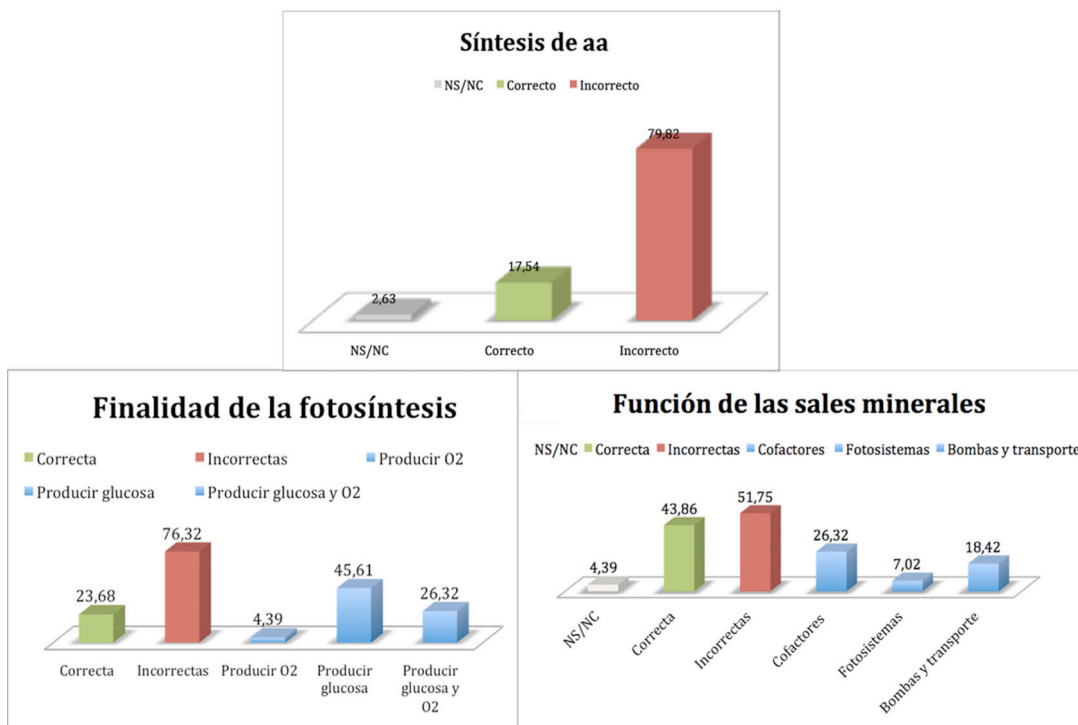


Imagen 4.5: Comparación de las gráficas de las preguntas 4, 7 y 8

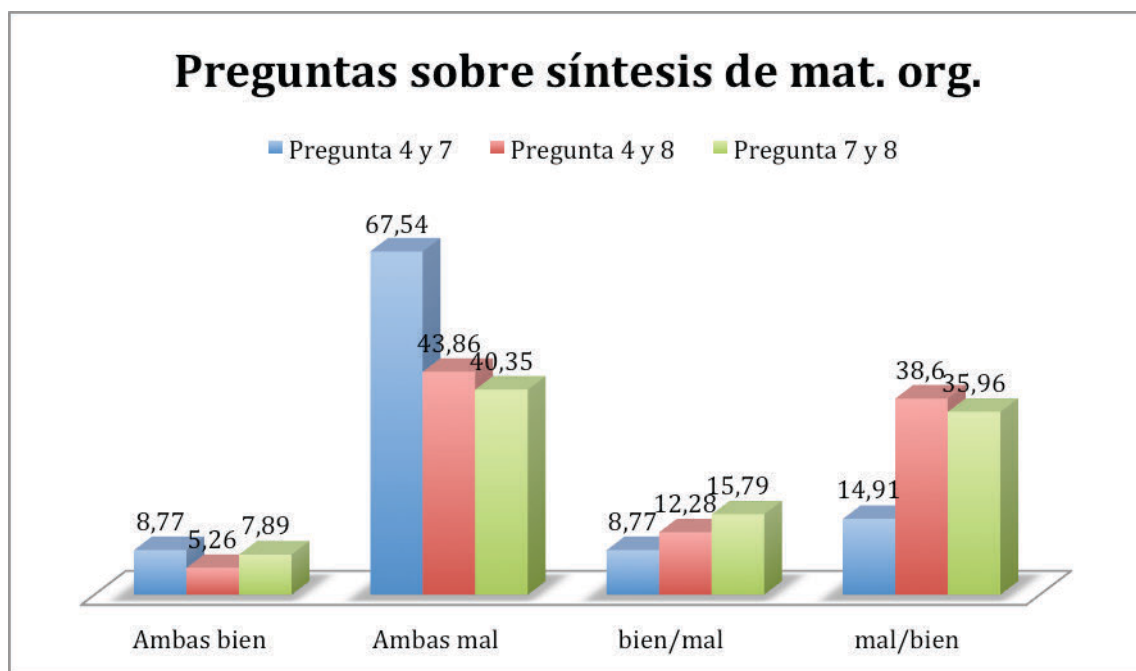


Gráfico 4.10: Comparación de preguntas 4, 7 y 8.

Al comparar estas tres preguntas observamos que del 17,54% que tuvo bien la pregunta 4 (Verdadero o falso: La síntesis de aminoácidos para formar proteínas forma parte del proceso fotosintético), solo la mitad (el 8,77%) respondieron correctamente a la pregunta 7 (¿Cuál es la finalidad de la fotosíntesis?); lo cual resulta muy llamativo ya que ambas respuestas están íntimamente relacionadas. La primera considera que la síntesis de aminoácidos forma parte del proceso fotosintético y la segunda afirma que la finalidad de la fotosíntesis es la de producir todos los componentes orgánicos que la planta necesita, de entre ellos los aminoácidos. Esta diferencia se hace mucho más acusada cuando se compara con la pregunta 8 (¿Para qué sirven las sales minerales como los nitratos y sulfatos?), pues solo el 5,26% acierta en las dos. El 12,28% de los encuestados responde que los aminoácidos forman parte del proceso pero no identifican a las sales minerales como sustratos que reducir hasta componentes orgánicos en el proceso fotosintético. Esto implica que el 70% de los que respondieron bien a la pregunta 4 no lo hacen en la pregunta 8.

De entre aquellos que tuvieron bien la pregunta 7 (¿Cuál es la finalidad de la fotosíntesis?) y dijeron que la fotosíntesis tiene como finalidad producir todos los componentes orgánicos que la planta necesita, incluidos los aminoácidos, un 62,96% no consideraron que la síntesis de aminoácidos formara parte del proceso fotosintético, considerando falsa la pregunta 4 (un 14,91% del total de los encuestados). La incoherencia es clarísima y, por lo que hemos comprobado, muy habitual entre los futuros docentes de ciencias. También encontramos que un 66,68% de los que consideraron que la fotosíntesis tiene esta finalidad contestaron erróneamente a la pregunta 8 (¿Para qué sirven las sales minerales como los nitratos y sulfatos?), lo que supuso un 15,79% de los estudiantes del Máster.

Cuando comparamos el 43,86% de los encuestados que contestaron correctamente a la pregunta 8 (¿Para qué sirven las sales minerales como

los nitratos y sulfatos?), considerando que estas sales minerales sirven para ser reducidas a componentes orgánicos como aminoácidos durante la fotosíntesis resulta aún más llamativo que el 88% de éstos considere falsa la pregunta 4 opinando, así, que la síntesis de aminoácidos no forma parte del proceso fotosintético (esto lo respondieron el 38,6% de los encuestados). También encontramos un porcentaje altísimo dentro de aquellos que respondieron bien a la pregunta 8 pero que fallan en la pregunta 7 (¿Cuál es la finalidad de la fotosíntesis?); un 81,99% de éstos considera que la finalidad de la fotosíntesis no es producir toda la materia orgánica que la planta necesita, como los aminoácidos, pero cree, al mismo tiempo, que a partir de las sales minerales, las plantas fabrican aminoácidos gracias a la fotosíntesis (lo que corresponde a un 35,96% de los estudiantes del Máster).

De esta manera podemos comprobar que la cuestión sobre la síntesis del resto de componentes orgánicos necesarios para la vida de la planta genera muchísimas incoherencias entre aquellos que, teóricamente, deben dominar el proceso de la nutrición vegetal lo suficiente como para explicársela a sus estudiantes en el futuro cercano. Eso sin contar con que la gran mayoría de los encuestados han hecho una carrera en la que han cursado la asignatura de botánica y de fisiología vegetal, como los que han hecho la carrera de Biología, Farmacia, Agrónomos, Ciencias Ambientales, etc.

4.2.2.2. Relación entre las preguntas 13 y 14: Destino de la savia bruta y de la savia elaborada

Al comparar ambas preguntas podemos ver que el 5,26% de los encuestados confunde ambos términos y de estos el 3,51% no solo los confunde sino que, además, cree que el único destino de uno de ellos son las raíces contestando que la savia bruta se dirige a las raíces y la savia

elaborada a las hojas (“B y A” en el gráfico). El 1,75% restante invierte la respuesta más común contestando que la savia bruta se dirige a todas las células mientras que la savia elaborada se dirige a las hojas (“C y A” en el gráfico). En este último caso se ve fácilmente que se han confundido ambos términos, con las repercusiones que eso puede tener en la comprensión del proceso general de nutrición vegetal.

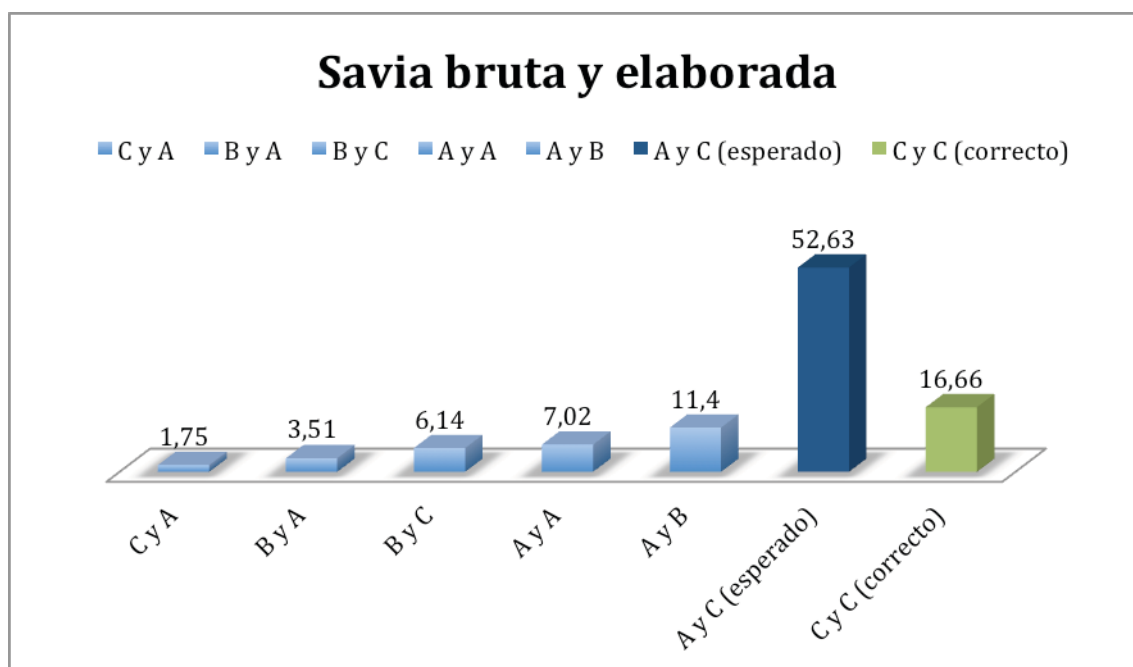


Gráfico 4.11: Preguntas 13 y 14.

Hay otras respuestas incoherentes con un índice de representación relativamente alto como que la savia bruta se dirige a las raíces mientras que la elaborada a todas las células, opción elegida por el 6,14% de los encuestados (“B y C” en el gráfico) o que tanto la savia bruta como la elaborada se dirigen a las hojas (“A y A” en el gráfico), elegida por el 7,02% de los alumnos del Máster.

Por otra parte de esto, también comprobamos que el 11,4% consideran que la savia bruta se dirige a las hojas y la savia elaborada se dirige

exclusivamente a las raíces, perdiendo completamente la visión de la función de esta última (“A y B” en el gráfico).

Con todo esto suman un 29,86% los encuestados que responden algo con unos niveles de error tan grandes que resulta difícil de explicar. El 52,63% de los futuros docentes de biología han optado por la opción que cabía esperar, aunque incorrecta, de que la savia bruta tiene como destino las hojas, mientras que la elaborada se dirige a todas las células. Como ya hemos dicho, era la esperada ya que en los libros de texto se expresa esta idea claramente y se remarca como una de las ideas claves en la comprensión del proceso de nutrición vegetal.

Solo el 16,66% de los encuestados han contestado que tanto la savia bruta como la elaborada se dirigen a todas las células. Cabe destacar, además, lo cercana que se encuentra esta cifra del 18,42% de acierto que se mostraba en el gráfico 4.9 sobre el destino de la savia elaborada; habiendo solo un 1,75% que hierra en la respuesta de la savia elaborada cuando acertó en la de la savia bruta; y como ya hemos explicado, esta opción (“C y A” en el gráfico) se explica entre aquellos que han confundido ambos términos. Al contrario de lo que ocurre entre aquellos que creen que el destino de la savia bruta son las hojas (71,05% en el gráfico 4.9), entre los cuales hay un 18,42% que contestan algo incoherente como que la savia elaborada también se dirige a las hojas (7,02%) y que se dirige de vuelta a las raíces (11,4%).

5. Conclusiones

Desde hace ya varias décadas, se está estudiando la problemática de la enseñanza de la fotosíntesis en las aulas y el aprendizaje de los contenidos fundamentales, y aunque cada día somos más conscientes de la dificultad que supone adquirir una comprensión adecuada de estos contenidos, la solución parece encontrarse aún lejos cuando, como se refleja en este estudio, los futuros profesores de biología de Secundaria y Bachillerato tienen tantas ideas alternativas y errores conceptuales sobre el tema. Además, cuando alguno de estos estudiantes, trabajando como profesores, al prepararse el temario o al trabajarlo en las aulas, se dé cuenta de alguna de estas deficiencias o incoherencias y acuda a los libros de fisiología vegetal, se encontrará con que es una tarea difícil llegar a comprender el proceso global e integrado ya que ni siquiera lo que describen estos manuales especializados está siempre explicado de la manera más apropiada. Estos libros pueden considerarse como los recursos más fiables donde los estudiantes avanzados, los profesores y los autores de libros de texto pueden acudir para aclarar sus dudas. Sin embargo, en lo que a la fotosíntesis se refiere, la explicación y el desarrollo del proceso en la mayoría de estos libros, está lleno de contradicciones y “vacíos” de información que dificultan la comprensión del proceso y, en consecuencia, el aprendizaje significativo.

Como resultado del análisis de los manuales utilizados, se ha podido comprobar que la mayoría de los manuales ofrecen diferentes definiciones generales de la fotosíntesis que varían desde aquellas que contemplan la fotosíntesis como un proceso de síntesis de azúcares exclusivamente, hasta aquellas que consideran que sirve para sintetizar todos los componentes orgánicos que la planta necesita. Además, el mismo manual puede ofrecer definiciones diferentes dependiendo de la página y el contexto en el que se encuentre, lo que se percibe como incoherente y dificulta mucho su comprensión.

A partir del análisis de los principales manuales universitarios, hemos observado que en todos ellos se divide la fotosíntesis en una fase dependiente

de luz, en la que se obtiene el ATP y el NADPH como los productos finales, y otra fase asimilatoria, donde se reducen uno o varios componentes inorgánicos oxidados (normalmente el CO_2) gracias a esa energía y ese poder reductor obtenidos en la primera fase. Hemos constatado que aquellos manuales que ofrecen la definición completa de la fotosíntesis, considerando ésta como la responsable de la producción de otros componentes orgánicos, además de los azúcares, nombran los nitratos y los sulfatos como esos componentes a reducir; sin embargo, en la mayoría de los manuales analizados solo encontramos la reducción asimilatoria del CO_2 . En cualquier caso, parece que es indiferente que los manuales ofrezcan en algún momento una visión integradora y global del proceso fotosintético o que no lo hagan, ya que todos ellos muestran una división rotunda entre la asimilación del CO_2 y la del resto de componentes inorgánicos. Esto puede comprobarse fácilmente revisando la manera en la que se ordenan los temas y en los títulos que ofrecen para cada uno de los procesos.

En este estudio hemos comprobado que el proceso de asimilación del CO_2 siempre se explica como la segunda fase de la fotosíntesis, mientras que los procesos de asimilación de los nitratos y de los sulfatos se suelen tratar como procesos relacionados con la fotosíntesis pero no como parte de esta. Esta visión se ofrece claramente en los manuales analizados que, a menudo, incluso, introducen otros temas que separan el metabolismo del carbono y el del nitrógeno y el azufre y que están poco o nada relacionados con la fotosíntesis como puede ser el de la respiración celular. Bajo este respecto nos gustaría resaltar que no es fácil de entender qué criterios se utilizan para considerar que la asimilación del CO_2 forme parte de la fotosíntesis y la del nitrato y el sulfato no, cuando los principios básicos son los mismos.

Además de estas incoherencias, en los manuales de fisiología vegetal también parece normal encontrar los términos *fase lumínica* y *fase oscura* cuyo uso debe considerarse, como mínimo, poco didáctico, pues puede inducir a muchas personas a entender que la segunda fase tiene lugar por la noche o cuando no

hay luz. Sin embargo, es importante resaltar que esto no es así, ya que varios pasos metabólicos se encuentran regulados por la luz y la propia enzima RuBisCO, responsable de la fijación del CO₂, es dependiente de luz. Asimismo, los intermediarios ATP y NADPH que se obtienen gracias a las reacciones energizadas por la luz, se acaban rápidamente cuando cesan estas reacciones y, sin embargo, se necesitan de forma continua para llevar a cabo la fase asimilatoria conocida tradicionalmente como *fase oscura*. De esta manera, ambas fases se dan, a excepción de las plantas CAM, en presencia de luz. Parece claro que el uso de estos términos puede considerarse poco adecuado y en este sentido los estudios al respecto muestran que están relacionados con algunos de los preconceptos de mayor influencia en los estudiantes.

En cuanto a los resultados obtenidos con el análisis de los cuestionarios contestados por los estudiantes del Máster Universitario en Formación del Profesorado de ESO y Bachillerato de Biología y Geología de la UCM, muestran claramente que estos estudiantes también tienen problemas a la hora de dar un sentido coherente a la nutrición vegetal. En estos cuestionarios se han detectado los mismos preconceptos que poseen los estudiantes de Secundaria y Bachillerato (Cañal, 1990; Eisen & Stavy, 1993; Abdullah & Scaife, 1997; Charrier & Obenat, 2001; Cañal, 2005, Prokop & Fancovicová, 2006; Köse, 2008; Anexo I). Y aunque parece que algunos de estos errores conceptuales, como la idea de que es peligroso dormir con plantas, parecen tener una incidencia mucho menor en los estudiantes del Máster, lo cierto es que aquellos relacionados con la visión de la fotosíntesis como un proceso parcial que no integra la síntesis de todos los componentes orgánicos que la planta necesita, tienen mucha influencia. También encontramos una presencia bastante marcada de aquellas ideas que confunden la fotosíntesis y la respiración celular en las plantas.

En el epígrafe 4.2.1 podemos ver los resultados a partir de los cuales extraemos estas conclusiones; parece que en estos niveles la idea de que es peligroso dormir con plantas ya no está muy presente, mientras que la idea de

que las raíces son la boca de las plantas ha aparecido en el 40% de los encuestados. Este resultado se podría explicar con la tendencia a buscar imágenes visuales que hagan más llamativo un concepto o, al menos, más cercano para los estudiantes; un recurso bastante utilizado por los docentes. No creemos que en estos niveles los estudiantes crean, de verdad, que las plantas tienen boca. Sin embargo, este resultado puede mostrar la tendencia de los futuros profesores a usar este tipo de símiles para explicar modelos anatómicos diferentes al del ser humano, lo que consideramos que es un error ya que en vez de ampliar el campo de conocimiento, algo muy importante en la formación en ciencias, restringe el pensamiento de los estudiantes.

También parece que la confusión entre la fotosíntesis y la respiración sigue bastante presente en estos niveles formativos. Según nuestro estudio, casi una cuarta parte de los encuestados creen que las plantas no necesitan respirar mientras realizan la fotosíntesis ya que obtienen la energía que necesitan del Sol y casi el 30% creen que las plantas hacen la fotosíntesis por el día y respiran por la noche. Además de esto, el 50% de los estudiantes del Máster de Formación del Profesorado de Biología y Geología encuestados, creen que la respiración y la fotosíntesis son procesos contrarios; el 30% que la finalidad de la fotosíntesis es producir oxígeno y el 64% que la finalidad del CO_2 es ser transformado en O_2 , reduciendo así el proceso fotosintético a un simple intercambio gaseoso.

En lo que respecta a la comprensión de la nutrición vegetal en su conjunto, los resultados de nuestro estudio muestran que el 26% de los estudiantes creen que la planta toma todas las sustancias que necesita del suelo, olvidando así el CO_2 ; el 71% de ellos piensa que el agua y las sales minerales solo se necesitan en las hojas para hacer la fotosíntesis y más del 70% creen que ser autótrofo significa no necesitar todos los nutrientes para realizar todas sus funciones. Además, el 72% de los encuestados creen que la finalidad de la fotosíntesis es producir solo azúcares y el 80% no considera la producción de aminoácidos como parte del proceso fotosintético. Sin embargo, resulta curioso

que el 44% de los encuestados consideren que las sales minerales sirven para ser reducidas a componentes orgánicos durante la fotosíntesis para fabricar aminoácidos, por ejemplo.

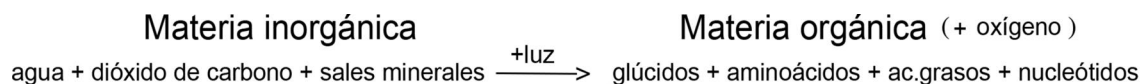
A la vista de todos estos resultados podemos afirmar que muchas de las concepciones alternativas que se detectan en los niveles de Secundaria y Bachillerato siguen bastante presentes en aquellos estudiantes que se están formando para ser profesores en estos cursos. También parece estar muy presente la incoherencia sobre la finalidad de la fotosíntesis. Cuando se pregunta por la función de las sales minerales el 44% de los encuestados responden que sirven para reducirse en compuestos orgánicos durante la fotosíntesis pero solo el 24% responde que durante la fotosíntesis se generan otros compuestos orgánicos aparte de los azúcares y solo el 18% considera que la síntesis de aminoácidos forma parte del proceso fotosintético. Estas variaciones en respuestas tan similares parecen mostrar el mismo patrón incoherente encontrado en los manuales de fisiología vegetal analizados.

El descubrimiento de la relación que existe entre la síntesis de aminoácidos (y resto de componentes orgánicos) y la fotosíntesis ocurrió hace varias décadas y sin embargo tanto los libros como los estudiantes, independientemente del nivel académico, muestran una gran resistencia a actualizar un esquema ya obsoleto en el que la fotosíntesis equivale exclusivamente a la síntesis de carbohidratos.

Proponemos pues que se integren la síntesis de aminoácidos y del resto de biosintetizados en el proceso de fotosíntesis. Sin embargo, no creemos que esta visión integradora y global conlleve, necesariamente, una mayor profundización del proceso, sino más bien a una generalización básica para comprenderlo de una forma general y como un todo. Pero para ello lo primero que debemos cambiar es ese esquema antiguo y tradicional que se refleja la gran mayoría de los libros de fisiología vegetal.

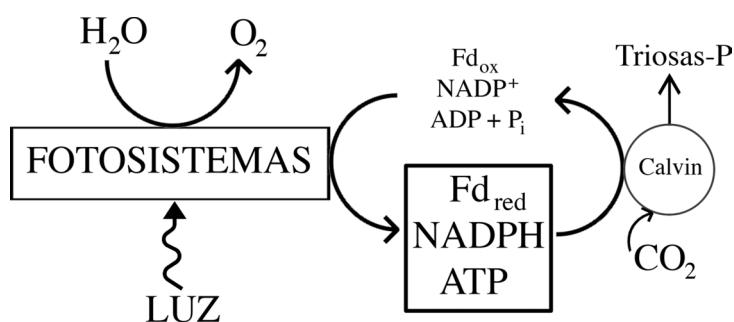
Para finalizar y a la vista de los resultados obtenidos así como de nuestra experiencia personal como profesores de biología en formación Secundaria y Bachillerato, sugerimos la siguiente propuesta para introducir la idea de la fotosíntesis como proceso global:

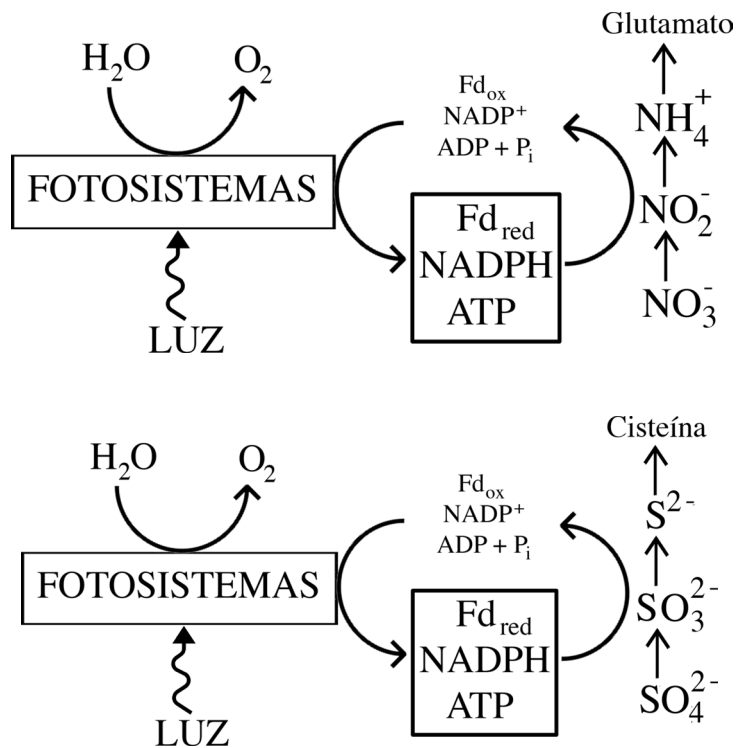
- En los niveles básicos en los que solo se nombra el proceso como algo propio de las plantas de gran importancia para la vida en la Tierra, se destacaría el papel de las plantas en los ecosistemas como organismos que transforman la energía del Sol en energía utilizable por el resto de seres vivos y que generan los nutrientes orgánicos (o alimentos, dependiendo del nivel de los estudiantes) del resto de los seres vivos. En este caso, siempre que se evite la frase de que *las plantas fabrican sus propios alimentos* o la de que *se alimentan por sí mismas*, no hay problema en usar alimento puesto que ellas serán el alimento de los demás organismos y esta idea no incurre en ningún error. Además, en lo que se refiere a la producción de oxígeno por parte de las plantas a causa de la fotosíntesis, no habría problema en que se explicara siempre y cuando se exprese como una consecuencia del proceso, no como su objetivo. Por nuestra experiencia personal, a los alumnos y alumnas les encanta la idea de que lo que es un desecho para ciertos organismos resulte útil e, incluso, imprescindible para otros. Lo que es un desecho para las plantas, como puede ser la orina (urea) para nosotros, es lo que otros organismos como nosotros mismos aprovechamos para vivir. Esta visión puede ser tanto o más llamativa para los estudiantes que la idea errónea de que las plantas tienen como objetivo producir el oxígeno que otros seres vivos, incluidas ellas mismas, necesitan.
- En los niveles donde los estudiantes tengan ciertos conocimientos de química y sepan lo que es el metabolismo, nuestra propuesta consistiría en sustituir la ecuación de la fotosíntesis de la producción de glucosa por una más general:



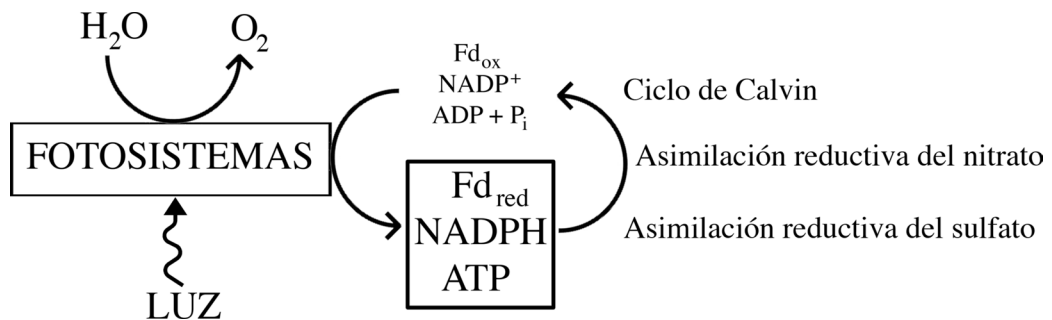
En este esquema, dependiendo del nivel de los estudiantes se podría escribir la fórmula química de cada uno de los componentes, sin olvidar que las sales minerales necesarias para la síntesis de todas las biomoléculas orgánicas son los nitratos, los sulfatos y los fosfatos, ya que los seis bioelementos esenciales son el carbono, el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno, el azufre y el fósforo. Otra de las explicaciones que se podría añadir a este esquema es la idea de que la materia inorgánica es materia con poca energía de enlace y está bastante oxidada, mientras que la materia orgánica es rica en energía de enlace y se encuentra reducida. Por lo tanto para conseguir transformar la materia inorgánica en materia orgánica es necesario la energía y un proceso de reducción que libera finalmente oxígeno. Todo esto se puede hacer sin necesidad de explicar fórmulas ni reacciones químicas si no se cree necesario aún por el nivel y por los conocimientos que poseen los estudiantes.

- Por último, en los últimos niveles de Bachillerato, cuando se explican los procesos a nivel bioquímico proponemos añadir al típico esquema donde solo se contempla la síntesis de azúcares a través del ciclo de Calvin, otros que muestren la primera fase de la fotosíntesis igual pero que cambien el elemento que se reduce y asimila:





En resumen, una visión más global, integradora y real del proceso fotosintético.



Por supuesto cada uno de estos esquemas se puede ampliar y completar con todos los detalles que se deseen acerca de las reacciones, las enzimas, las moléculas, etc. Pero lo que jamás se puede perder de vista es la visión global del proceso.

Es cierto que este estudio tiene algunas limitaciones claras ya que, como se ha comentado, las causas de esta desestructuración del aprendizaje de la nutrición vegetal y de la fotosíntesis parecen deberse a varios factores interrelacionados (Battinger *et al.*, 1988; Cañal, 1990) como, por ejemplo, una mala temporalización de los contenidos trabajándose procesos bioquímicos mucho antes de que los estudiantes tengan conocimientos de química; una formación científica deficiente de los docentes de Educación Primaria que imparten todas las asignaturas; inadecuada e insuficiente preparación didáctica; un esquema rígido de la organización escolar y las influencias negativas del contexto sociocultural cotidiano (Cañal 1990). Por ello es importante reconocer que en este trabajo solo nos hemos centrado en los conocimientos de los futuros docentes de Secundaria y Bachillerato acerca del tema en cuestión y del planteamiento didáctico de los libros de fisiología vegetal sobre la fotosíntesis, dejando a un lado el estudio o la relación de otros factores que pueden tener gran relevancia. Además, la propuesta didáctica tiene una limitación clarísima para aquellos niveles en los que al final del curso los estudiantes se enfrenten a una evaluación externa, ya que, por desgracia, en muchas ocasiones, en estos cursos parece más importante preparar a los estudiantes para la prueba que deben superar que en los conocimientos actuales. No tendría sentido que el curso de 2º de Bachillerato se les explicara algo que después no deben escribir en las pruebas de acceso a la universidad puesto que los evaluadores pueden considerarlo erróneo. Con las nuevas pruebas en 4º de la ESO, esta traba se extiende hasta este curso.

A pesar de estas limitaciones, esta investigación nos ha permitido conocer con seguridad muchas de las concepciones de la población estudiada. Sin embargo, también nos preguntamos si son estos resultados extrapolables a otros estudiantes del Máster de Formación del Profesorado españoles. Probablemente sí ya que estos habrían estudiado con los mismos manuales y en un contexto educativo similar. Sin embargo, extender la investigación a otros estudiantes del Máster aumentaría el tamaño muestral y aseguraría una mayor representatividad a nivel nacional. También creemos oportuno realizar la

investigación en individuos que se estén formando como profesores en otros países. Sabemos que dos de los manuales de fisiología utilizados, el Strasburger, (2003) y el Lincoln Taiz, (2006), son muy importantes en otros países como Reino Unido, Francia o Alemania y, además, que la mayoría de las ideas alternativas respecto a la nutrición vegetal y a la fotosíntesis se pueden encontrar en los estudiantes de la mayoría de los países (Köse, 2008). Suponemos que los estudiantes que se estén formando para ser profesores en estos países también tendrán muchas de estas ideas alternativas. Además, el estudio podría completarse estudiando las concepciones de los profesores de Secundaria y Bachillerato que se encuentran actualmente ejerciendo como docentes de biología, aunque estos, por norma general, se muestran bastante más reacios a participar de cuestionarios como el que proponemos.

Lo que sin duda resultaría interesante sería comprobar si el modelo propuesto ayuda a asimilar mejor los conocimientos acerca de la nutrición vegetal y de la fotosíntesis en los estudiantes de Secundaria y Bachillerato. Lo cierto es que llevamos 2 años utilizándolo en el aula en los niveles de 1º, 3º, 4º de la ESO y 1º de Bachillerato, y creemos que funciona bastante bien; pero habría que proponer un buen diseño experimental y comprobar su eficacia mediante una investigación.

Por último, nos gustaría aprovechar la oportunidad para insistir en la conveniencia de seguir investigando sobre la enseñanza de la nutrición vegetal y comprobar si este modelo propuesto puede ayudar a eliminar o, al menos reducir, la gran cantidad de errores conceptuales sobre este tema ya que, como hemos visto en este estudio aún queda mucho camino para conseguir eliminar las ideas alternativas y errores conceptuales acerca del proceso de la fotosíntesis en todos los niveles. No podemos olvidar que la fotosíntesis es un proceso bioquímico de difícil comprensión para los niveles de enseñanza secundaria, pero esencial para la comprensión global de la fisiología de los seres vivos, por lo tanto tiene un valor muy grande como concepto a comprender y manejar por parte de los estudiantes. Además es un ejemplo

perfecto de interdisciplinaridad muy interesante ya que engloba conceptos químicos, físicos y biológicos, además de tener valor educativo añadido como posible concienciador medioambiental.

6. Bibliografía

- ABDULLAH, A. & SCAIFE, J. (1997). Using interviews to assess children's understanding of science concepts. *School Sci. Rev.*, 78 (285), 79-84.
- ABELSON, P. H. & HOERING, T. C. (1961). Carbonisotope fractionation in formation of amino acids by photosynthetic organisms. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 47, 623-32.
- AKKER, VAN DER (1998). The Science Curriculo: Between Ideals and Outcomes. En B. J. Fraser & K. G. Tobin (Eds.), *International Handbook of Science Education*, (pp. 421-447). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Press.
- ANDERSON, C.W. SHELDON, T.H. & DUBAY, J. (1990). The effect of instruction on collage nonmajors' conceptions of photosynthesis and respiration. *J. Res. Sci. Teaching*, 27 (8), 761-776.
- ANDERSON, L., WORTHEN, L. E. & FULLER, R. D. (1968): The Role of Ribose-5-P Isomerase in Regulation of the Calvin Cycle in *Rhodospirillum Rubrum*. En Comparative Biochemistry and Biophysics of Photosynthesis. (SHIBATA, K., TAKAMIYA, A., JAGENDORF, A. T. & FULLER, R. C. eds.). University of Tokyo Press. 379 pp.
- ANGOSTO, I. (2013) "Fotosíntesis en los manuales universitarios de fisiología vegetal". En: M. González Montero de Espinosa, A. Baratas Díaz y A. Brandi Fernández (eds.) *Jornadas sobre Investigación y Didáctica en ESO y Bachillerato. Estrategias docentes y estrategias de innovación educativa para la enseñanza de la Biología, la Geología, la Física y la Química*. "Actas del II Congreso de Docentes de Ciencias de la Naturaleza" (pp. 255-263). Madrid, Santillana.
- ANGOSTO, I. & MORCILLO, J. G. (2014) "La concepción histórica de la fotosíntesis y su relación con la enseñanza actual". *Enseñanza e Historia*

de las Ciencias y de las Técnicas. “*Actas del VII Simposio de Enseñanza e Historia de las Ciencias y de las Técnicas de la SEHCYT*” (pp. 365-370). Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas (SEHCYT), Barcelona.

- ANGOSTO, I. & MORCILLO, J. G. (2015). “La concepción de la nutrición vegetal en los futuros profesores de Secundaria”. En: M. González Montero de Espinosa, A. Baratas Díaz y A. Brandi Fernández (eds.) *Jornadas sobre Investigación y Didáctica en ESO y Bachillerato. III Congreso de Docentes de Ciencias. Experiencias docentes y estrategias de innovación educativa para la enseñanza de la Biología, la Geología, la Física y la Química. “Actas del III Congreso de Docentes de Ciencias de la Naturaleza”* (pp. 25-33). Madrid, Santillana.
- ARTUN, H. & COŞTU, B. (2011). Unveiling Primary Stude-teachers’ Misconceptions about Diffusion and Osmosis. *Journal of Turkish Science Education*, 8(4), 117-127.
- ASIMOV, I. (1988). *Enciclopedia biográfica de ciencia y tecnología*. Alianza Editorial Mexicana – SEP. México.
- ASTUDILLO, H. & GENÉ, A.M. (1984). Errores conceptuales en biología. La fotosíntesis de las plantas verdes. *Enseñanza de las Ciencias*, 2 (1), 15-16.
- AUSUBEL-NOVAK-HANESIAN (1983). *Psicología Educativa: Un punto de vista cognoscitivo*. 2º Ed. TRILLAS. México.
- AYDOĞAN, S., GÜNEŞ, B. & GÜLÇİÇEK, Ç. (2003). Isı ve Sıcaklık Konusunda Kavram Yanılgıları. *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 2, 111-124.

- AZCÓN-BIETO, J. & TALÓN, M. (2003). *Fundamentos de Fisiología vegetal*. Madrid. Ed. McGraw-Hill Interamericana. Edicions Universitat de Barcelona.
- BAKER, J. J. W & ALLEN, G. E. (1970). *Biología e investigación científica*. Fondo Educativo Interamericano. Bogotá.
- BANET, E. & NÚÑEZ, F. (1990). Esquemas conceptuales de los alumnos sobre respiración. *Enseñanza de las Ciencias*, 8(2),105-110.
- BARCELÓ COLL, J., NICOLÁS RODRIGO, G., SABATER, B. & SÁNCHEZ TAMÉS, R. (2003). *Fisiología vegetal*. Ediciones Pirámide. Madrid.
- BASSHAM, J. A., BENSON, A. A. & CALVIN, M. (1950). The path of carbon in photosynthesis VIII. The role of malic acid. *Radiation Laboratory*, Berkeley, California. pp. 781-787.
- BATTINGER, R., TRAMOY, M., CAENS, S. & MILLOT, J. (1988). “*Nutrition de la plante, en les représentations des élèves en Biologie*”. Dijon, INRAP-ENSSAA-Lycees Agricoles.
- BELL, B. & BROOK, A. (1984). Aspects of secondary students’ understanding of plants nutrition: full report. *Children’s learning in Science Project*, University of Leeds.
- BENSON, A. A., CALVIN, M., HASS, V. A., ARONOFF, S., HALL, A. G., BASSHAM, J. A. & WIGL, J. W. (1949). Carbon Dioxide Fixation by Green Plants. En *Photosynthesis in plants* (FRANCK, J. & LOOMIS, W. E. Eds.). Iowa ST. Coll. Press. Amer. pp. 381.
- BISHOP, B. A., ROTH, K. J. & ANDERSON, C. W. (1986). *Respiration and photosynthesis: a teaching module*. Michigan State Universty, Michigan.

- BIZQUERRA, R. (2003) *Metodología de la investigación educativa*. La Muralla. Madrid, pp. 464.
- BLANKENSHIP, R. E. (1992). Origin and early evolution of photosynthesis. *Photosynthesis Research*, 33, 91-111.
- BRUSH, S. (1989). History of science and science education. *Interchange* 20(2), 60-70.
- BUCHANAN, B. B., KALBERER, P. P. & ARNON, D. I. (1967). Ferredoxin-activated fructose diphosphatase in isolated chloroplasts. *Biochem Biophys Res Commun.* 29, 74-79.
- CABALLERO ARMENTA, M. (2008). Algunas ideas del alumnado de secundaria sobre conceptos básicos de genética. *Enseñanza de las Ciencias*, 26(2), 227-244.
- CAMPESTRINI, P. (1992). Sortir de la logique de Van Helmont. *Aster*, 15, 85-100.
- CAÑAL, P. (2005). *La nutrición de las plantas: enseñanza y aprendizaje*. Madrid, Síntesis.
- CAÑAL, P. (1999). Photosynthesis and 'inverse respiration' in plants: an inevitable misconception. *International Journal of Science Education*, 4, 363-371.
- CAÑAL, P. (1990). *La enseñanza en el campo conceptual de la nutrición de las plantas verdes. Un estudio didáctico en la Educación Básica*. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Sevilla.

- CAÑAL, P. & RASILLA, C. (1986). Une étude sur le niveau de structuration des concepts “photosynthèse” et “respiration” des étudiants de l’Ecole Normale. *Feuilles d’Epistémologie Appliquée et de Didactique des Sciences*, 8, 39-44.
- ÇAPA, Y. (2000). *An analysis of 9th grade students’ misconceptions concerning photosynthesis and respiration in plants*. Master Thesis, Middle East Technical University, Turkey.
- CAREY, S. (1985). *Conceptual change in childhood*. Cambridge, Ma.: MIT Press.
- CARGNATO SPOSITO, N. & CALDEIRA DE ANDRADE, A. (2000). Equívoco conceitual entre fotossíntese e respiração. *II Congresso Iberoamericano de Educação de Ciências Experimentales*. Córdoba, Argentina.
- ÇEPNI, S., & KELEŞ, E. (2006). Turkish students’ conceptions about the simple electric circuits. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 4, 269-291.
- ÇEPNI, S., TAS, E. & KÖSE, S. (2006). The effects of computer-assisted material on students’ cognitive levels, misconceptions and attitudes towards science. *Computers and Education*, 46 (2), 192-205.
- CHARRIER MELILLÁN, M., CAÑAL, P. & RODRIGO VEGA, M. (2006). Las concepciones de los estudiantes sobre la fotosíntesis y la respiración: Una revisión sobre la investigación didáctica en el campo de la enseñanza y el aprendizaje de la nutrición de las plantas. *Enseñanza de las Ciencias*. 24(3), 401-410.

- CHARRIER MELILLÁN, M. & OBENAT, S. (2001). "Estudio de las concepciones de futuros maestros y profesores argentinos acerca de la fotosíntesis y la respiración". *Enseñanza de las Ciencias* 2, 282.
- CHEVALLARD, Y. (1985). *La transposición didáctica*. Grenoble: La Pensée sauvage.
- CHI, M. T. H. (1992). Conceptual Change within and across Ontological Categories: Examples from Learning and Discovery in Science. En R. Giere (Ed.), *Cognitive Models of Science. Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. Volume XV, pp. 129-186. Minnesota, Ma.: University of Minnesota Press.
- DALEFFE; L., DE NAVARRETE, E., DÍAZ, B. & SALA, H. (2000). Fotosíntesis: Una historia para pensar. *II Congreso Iberoamericano de Educación en Ciencias Experimentales*. Córdoba, Argentina.
- DRIVER, R., CHILD, D., GOTT, R., HEAD, J., JOHNSON, S., WORSKEY, C. & WYLIE, F. (1984). *Science in school at age 15*. Report Nº 2. Report to the DES, DENI and the Welsh Office on the 1981 survey of 15 years olds. London: Assessment of Performance Unit, Londres, UK.
- DUIT, R. (1984). Learning de energy concept in school: empirical results from the Phillippines and West Germany. *Physics Education*, 19, 59-66.
- DUSCHL, R. A. (1995). Marcos de aplicación da Historia e Filosofía da Ciencia para o deseño do encino das Ciencias da Terra. En Brañas, M., González, M. C. y Jiménez, M. P. (eds). *Taballando coas Ciencias da Terra*, (pp. 157-157). ICE, Servicio de Publicaciones Universidade de Santiago de Compostela.

- EISEN, Y. & STAVY, R. (1993). "How to make the learning of photosynthesis more relevant". *International Journal of Science Education*, 15(2), 117-125.
- EISEN, Y. & STAVY, R. (1988). Student's understanding of photosynthesis. *American Biology Teacher*, 50(4), 208-212.
- EPSTEIN, E. & BLOOM, A. J. (2004). *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*. 2nd Edition, Sunderland, Sinauer Associates, Inc. Publishers.
- ERICKSON, G. (2000). Research programmes and the student science learning literature. En R. Millar, J. Leach & J. Osborne (Eds.), *Improving Science Education* (pp. 271-292). Buckingham U.K.: Open University Press.
- FENSHAM, P. (2000). Providing suitable content in the 'science for all' curriculum. En R. Millar, J. Leach & J. Osborne (Eds.), *Improving Science Education* (pp. 1147-164). Buckingham U.K.: Open University Press.
- FLORES, F. (1999). *Estructura y procesos de inferencia en las ideas físicas de los estudiantes: modelos semiformalizados sobre ideas previas*. Tesis de Doctorado no publicada, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., México.
- FLORES, F. & GALLEGOS, L. (1998). Partial possible models: an approach to interpret students' physical representation. *Science Education* 82, 15-29.
- FRIEDMAN, M. (2004). Applications of the ninhydrin reaction for analysis of amino acids, peptides, and proteins to agricultural and biomedical sciences. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 385-406.

- FURIÓ, C. J. (1996). Las concepciones alternativas del alumnado en ciencias: dos décadas de investigación. Resultados y tendencias. *Alambique*, 7, 7-17.
- FURIÓ, C., AZCONA, R., GUIASOLA, J. & DOMÍNGUEZ, C. (2000). La enseñanza y el aprendizaje del conocimiento químico. En: Perales, F. J. y Cañal, P. (eds.). *Didáctica de las ciencias experimentales. Teoría y práctica de la enseñanza de las ciencias* (pp. 421-448). España: Editorial Marfil, S.A.
- GALLEGOS, C., L. (1998). *Formación de conceptos y su relación con la enseñanza de la física*. Tesis de Maestría no publicada, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., México.
- GARCÍA LÓPEZ, M. & HOYAS RAMOS, M. E. (2015). *Biología y geología. ESO 3*. Zaragoza. Edelvives.
- GARCÍA ZAFORAS, A. M. (1991). Estudio llevado a cabo sobre las representaciones de la respiración celular en los estudiantes de bachillerato y COU. *Enseñanza de las Ciencias*. 9(2), 129-134.
- GEST, H. (1997). "A 'misplaced chapter' in the history of photosynthesis research; the second publication (1796) En plant processes by Dr Jan Ingen-Housz, MD, discovered of photosynthesis". *Historical corner. Photosynthesis Reserch*. 53, 65-72.
- GIL, D., CARRASCOSA, J. & MARTÍNEZ, F. (2000). Una disciplina emergente y un campo específico de investigación. En Perales, F. J. y Cañal, P. (eds.) (2000). *Didáctica de las ciencias experimentales. Teoría y práctica de la enseñanza de las ciencias* (pp. 11-34). España: Editorial Marfil, S.A.

- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, C., GARCÍA BARROS, S. & MARTÍNEZ LOSADA, C. (2003). ¿A qué contenidos relacionados con la fotosíntesis dan más importancia los libros escolares de secundaria?. *Enseñanza de las Ciencias*. Número extra, pp. 77-88.
- GRIFFARD, P. B. (2001). The two-tier instrument on photosynthesis: what does it diagnose? *International Journal of Science Education*, 10, 1039-1052.
- GUYÉNOT, E. (1956). *Las ciencias de la vida en los siglos XVII y XVIII*. UTEHA. México.
- HASLAM, F. & TREAGUST, D.F. (1987). "Diagnosing secondary students' misconceptions of photosynthesis and respiration in plants using a two-tier multiple-choice instrument". *J. Biol. Edu.*, 21(3), 203-211.
- HATCH, M. D. & SLACK, C. R. (1966). Photosynthesis in sugarcane leaves: anew carboxylation reaction and the pathway of sugar formation. *Biochem. J.*, 101, 103-111.
- HATCH, M. D. & SLACK, C. R. (1967). The participation of phosphoenolpyruvate synthase in photosynthetic CO₂ fixation of tropical grasses. *Arch. Biochem. Biophys.* 129: 224-225.
- HATCH, M. D. & SLACK, C. R. (1968). A new enzyme for the interconversion of pyruvate and phosphopiruvate and its role in the C₁ dicarboxylic acid pathway of photosynthesis. *Biochem. J.*, 106: 141-146.
- HAZEL, E. & PROSSER, M. (1994). "First-year university students' understanding of photosynthesis, their study strategies and learning context". *The American Biology Teacher*. 56(5), 274-279.

- HEBER, U., PON, N. G. & HEBER, M. (1963). Localization of carboxydismutase and triosephosphate dehydrogenases in chloroplasts. *Plant Physiol.*, 38, 355-360.
- HILL, D.G. (1997). *Conceptual change through the use of student-generated analogies of photosynthesis and respiration by college nonscience majors*. Ph. D Thesis , Georgia University, Athens, Georgia, USA.
- JONES M., G., CARTER, G. & RUA, M. (1999). Children's concepts: tools for transforming science teachers' knowledge. *Science Education*_83, 545 - 557.
- KELEŞ, E. & KEFELİ, P. (2010). "Determination of student misconceptions in "photosynthesis and respiration" unit and correcting them with the help of cai material". *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2, 3111-3118.
- KÖSE, S., AYAS, A. & TAŞ, E. (2003). Bilgisayar destekli öğretimin kavram yanlışları üzerine etkisi: fotosentez. *Pamukkale Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*. 13, 43-53.
- KÖSE, S. (2008). "Diagnosing Student Misconceptions: Using Drawings as a Research Method". *World Applied Sciences Journal*. 3(2), 283-293.
- LEDESMA MATEOS, I. (2000). *Historia de la biología*. México. A.G.T. Editor, S.A.
- LOSADA VILLASANTE, M.; VARGAS, M. A.; DE LA ROSA, M. A. & FLORENCIO, F. J. (1998). *Los Elementos y Moléculas de la vida: introducción a la Química Biológica y Biología Molecular*. Madrid, Editorial Rueda, 2 vols.

- MARMAROTI, P. & GALANOPOULOU, D. (2006). Pupils' understanding of photosynthesis: A questionnaire for the simultaneous assessment of all aspects. *International Journal of Science Education*, 28, 383-403.
- MARTÍNEZ, C., GARCÍA, S., VEGA, P. & MONDELO, M. (1998). Enseñar ciencias en educación primaria: ¿Qué tipos de actividades realizan los profesores?. En Martínez Losada, C. y García Barros, S. (eds). *La Didáctica de las Ciencias. Tendencias actuales* (pp. 199-210). A Coruña: Universidade da Coruña.
- MASKILL, R. & CACHAPUZ, A.F.C. (1989). "Learning about the chemistry topic of equilibrium: The use of word association tests to detect developing conceptualizations". *Intl. J. Sci. Edu.* 11(1), 57-69.
- MATHEWS, M. (1990). History, philosophy and science teaching. What can be done in an undergraduate course? *Studies in Philosophy and Education* 10, 93-97.
- NORDENSKIÖLD, E. (1949). *Evolución histórica de las ciencias biológicas*. Espasa Calpe. Buenos Aires.
- OXFORD UNIVERSITY PRESS (1998). *Diccionarios Oxford-Complutense: Biología*. Editorial Complutense, S. A. Madrid.
- ÖZAY, E. & ÖZTAS. H. (2003). Secondary student's interpretations of photosynthesis and plant nutrition. *Journal of Biological Education*, 37(2), 68-70.
- ÖZAY, E. (2001). *The investigations into high school students' misconceptions of photosynthesis*. Master Thesis, Atatürk University, Turkey.

- PACCAUD, M. (1991). Les conceptions comme levier d'apprentissage du concept de respiration. *Aster*, 13, 35-59.
- PARCERISA, A. (1996). *Materiales curriculares. Cómo elaborarlos, secuenciarlos y usarlos*. Barcelona: Graó.
- PEDRINACI, E., GIL, C., PASCUAL, J. A., HIDALGO, A. J. & CARRIÓN, F. (2015). *Biología y Geología para 3º de la ESO*. Sm.
- PFUNDT, H. & DUIT, R. (1994). Bibliography: *Students' alternative frameworks and science education* (4a. ed.). Kiel: Institute for Science Education, University of Kiel.
- POSADA de, J. M. (2000). El estudio didáctico de las ideas previas. En Perales, F. J. y Cañal, P. (eds.). *Didáctica de las ciencias experimentales. Teoría y práctica de la enseñanza de las ciencias* (p.p. 363-388). España: Editorial Marfil, S.A.
- PORLÁN, R. (1998). Pasado, presente y futuro de la didáctica de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 16 (1), 175-186.
- POZO, J. I. (1996). Las ideas del alumnado sobre ciencia: de dónde vienen, a dónde van... y mientras tanto qué hacemos con ellas. *Alambique*, 7, 18-26.
- POZO, J. I. & GÓMEZ, M. A. (1997). ¿Qué es lo que hace difícil la comprensión de la ciencia? Algunas explicaciones y propuestas para la enseñanza, en Del Carmen, L. (ed). *La enseñanza y el aprendizaje de las ciencias de la naturaleza en la educación secundaria*. Barcelona: ICE. Horsori.

- POZO, J. I. & GÓMEZ, M. A. (2001, 3^{ra} ed.). *Aprender y enseñar ciencia*. Madrid: Ediciones Morata.
- PROKOP, P. & FANCOVICOVÁ, J. (2006). "Students' ideas about the human body: Do they really draw what they know?" *J. Baltic Sci. Edu.* 2(10), 86-95.
- REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES (1999). *Diccionario esencial de las ciencias*. Espasa Calpe, S. A. Madrid.
- RENNIE, L. J. & JARVIS, T. (1995). English and Australian children's perceptions about technology. *Research in Science & Technology Education*. 13, 37-52.
- RICHARDS, D. (1989). The relationships between the attributes of life and life judgments. *Human Development*, 32, 95-103.
- RUBEN, S., HASSID, W. Z. & KAMEN, M. D. (1939). Radioactive carbon in the study of respiration in heterotrophic systems. *J. Am. Chem. Soc.*, 61, 661-663.
- RUMELHARD, G. (1985). Quelques représentations a propos de la photosynthèse. *Aster*, 1, 37-66.
- RUSSELL, E. j. & WILD, A. (1988). *Russell's Soil Conditions and Plant Growth*. 11th edition, Essex, Wild, A., ed. Longman Scientific & Technical, Burnt Mill, Harlow, copublished New York, John Wiley & Sons.
- SÁNCHEZ, G. & VALCÁRCEL, M. V. (2000). ¿Qué tienen en cuenta los profesores cuando seleccionan el contenido de enseñanza? Cambios y dificultades tras un programa de formación. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(3), 423-437.

- SANDERS, M., (1993). Erroneous ideas about respiration: The teacher factor. *J. Res. Sci. Teaching*, 30 (8), 919-934.
- SCHOON, K. & BOONE, W. (1998). Self-efficacy and alternative conceptions of science of preservice elementary teachers. *Science Education* 82, 553-568.
- SENSOY, Ö. (2002). *A survey study of primary education 6th, 7th and 8th grade students misconceptions about photosynthesis*. Master Thesis, Gazi University, Turkey.
- SELVI, M. & YAKIŞAN, M. (2004). Misconceptions about Enzymes in University Students. *Gazi Eitim Fakültesi Dergisi*, 2, 173-182.
- SINGER, CH. (1947). *Historia de la biología*. Espasa Calpe. Buenos Aires.
- SONGER, J.C. & MINTZES, J.J. (1994). Understanding cellular respiration: An analysis of conceptual change in college biology. *J. Res. Sci. Teaching*, 31 (6), 621-637.
- SOYIBO, K. (1983). Selected science misconceptions among some Nigerian school certificate students'. En Helm, H. Y Novak, J. D. (eds). *Proceedings of the International Seminar. Misconceptions in Science and Mathematics*, (pp.425-427). Ithaca, Nueva York, EEUU. Dept. of Education, Cornell University.
- SPOEHR, H. A. & MCGEE, J. M. (1923). *Studies in Plant Respiration and Photosynthesis*. Carnegie Institution of Washington. Judd & Detweiler, INC, Washington, D. C.

- STAVY, R., EISEN, Y. & YAAKOBI, D. (1987). How students aged 13-15 understand photosynthesis. *International Journal of Science Education*, 9 (1), 105-115.
- STEPKA, W., BENSON, A. A. & CALVIN, M. (1948). *The path of carbon in photosynthesis. II. Amino acids. Radiation Laboratory*. University of California. Berkeley, California.
- STRIKE, K. & POSNER, G. (1985). A conceptual change view of learning and understanding. En L. H. T. Pines & A. L. West (Eds.), *Cognitive Structures and Conceptual Change* (pp. 211-232). Orlando, Florida: Academic Press.
- TAMIR, P. (1989). Some issues related to the use of justifications to multiple-choice answers. *J. Biol. Edu.*, 23 (4), 285-292.
- TEKKAYA, C. & S. BALCI, (2003). Determination of students' misconceptions concerning photosynthesis and respiration in plants. *Hacettepe University Journal of Education*, 24, 101-107.
- THOMAS, G.V. & SILK, A.M.J. (1990). *An introduction to the psychology of children's drawings*. Hemel Hempstead, Harvester Wheat Sheaf.
- TIBERGHEN, A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and Instruction* 4, 71-87.
- VICENTE, C. (1976). *Fisiología Vegetal*. Editorial Blume, Madrid.
- VUALA, J. (1991). Le rôle d'un dessin animé dans l'évolution des conceptions d'élèves sur la respiration. *Aster*, 13, 7-34.

- WANDERSEE, J.H. (1983). Students' misconceptions about photosynthesis: A cross age study. *Proceedings of the International Seminar on Misconceptions in Science and Mathematics* (pp: 441-466). Ithaca, NY: Cornell University.
- WANDERSEE, J.; MINTZES, J. & NOVAK, J. (1994). Research on alternative conceptions in science. En Gabel, Dorothy (ed.) *Handbook of Research on science teaching and learning* (177-210). New York: Macmillan Publishing Co.
- WATTS, M. & BENTLEY, D. (1994). Humanizing and feminizing school science: reviving anthropomorphic and animistic thinking in constructivist science education. *International Journal of Science Education* 16(1), 83-97.
- WHITELEGG, E. (1996). Gender effects in science classrooms. En G. Welford, J. Osborne & P. Scott (Eds.), *Research in Science Education in Europe* (pp. 297-311). London, U.
- YENILMEZ, A. & TEKKAYA, C. (2006). Enhancing students' understanding of photosynthesis and respiration in plant through conceptual change approach. *Journal of Science Education and Technology*, 15, 81-87.

Anexo I.

Estudio previo

Como ya se expuso al principio de este trabajo, para llegar a definir los objetivos de esta Tesis, antes realizamos un pequeño estudio que sirvió para comprobar si la situación de la enseñanza de nutrición vegetal y, en especial, de la fotosíntesis era tan alarmante como la que se exponía en las diferentes investigaciones realizadas hasta el momento (Wandersee, 1983; Astudillo & Gené, 1984; Rumelhard, 1985; Bishop *et al.*, 1986; Haslam & Treagust, 1987; Stavy *et al.*, 1987; Battinger *et al.*, 1988; Maskill & Cachapuz, 1989; Tamir, 1989; Anderson *et al.*, 1990; Cañal, 1990; Thomas & Silk, 1990; Eisen & Stavy, 1993; Hazel & Prosser, 1994; Songer & Mintzes, 1994; Abdullah & Scaife, 1997; Hill, 1997; Çapa, 2000; Charrier & Obenat, 2001; Griffard, 2001; Özay, 2001; Sensoy, 2002; Tekkaya & Balci, 2003; Cañal, 2005; Çepni & Keleş, 2006; Charrier, *et al.*, 2006; Marmaroti & Galanopoulou, 2006; Prokop & Fancovicová, 2006; Yenilmez & Tekkaya, 2006; Köse, 2008; Keleş & Kefeli, 2010; Angosto, 2013). Ese trabajo, finalmente, adquirió forma de Trabajo Fin de Máster en el curso 2010-2011 y se basó en el diseño de un cuestionario que buscaba detectar la presencia de ciertos preconceptos e ideas alternativas sobre el tema de la nutrición de las plantas en alumnos de Educación Secundaria y Bachillerato.

A pesar de que es en los niveles de Educación Primaria donde aparecen las primeras ideas alternativas sobre los procesos de nutrición vegetal y fotosíntesis, es en Secundaria cuando estos temas se empiezan a trabajar y en Bachillerato cuando se profundiza sobre ellos y se consideran totalmente desarrollados, alcanzando niveles de concreción bioquímico. Por lo tanto, consideramos que estos eran los niveles más idóneos para estudiar esas ideas alternativas y los preconceptos que poseían los estudiantes acerca de la nutrición de las plantas y el proceso fotosintético.

Aunque el estudio ya tenía cierto interés por sí mismo, según nos introdujimos en estos tópicos encontramos una idea que nos resultó tan llamativa como alarmante: los preconceptos, en el tema de la fotosíntesis, aumentan a medida que los alumnos avanzan en su formación académica (Cañal, 2005). Así,

además de investigar los preconceptos en los niveles de Secundaria obligatoria y Bachillerato, intentaríamos comprobar si existía realmente esta tendencia de los conceptos alternativos a aumentar según avanzábamos en los niveles de estudio.

Por supuesto, una de las dificultades que nos encontramos al principio fue el diseño del cuestionario para que pudiera entenderse en niveles tan alejados y a la vez resultara interesante y representativo para los niveles superiores. Los alumnos de 1º y 2º de la ESO carecían de formación suficiente en el terreno de la química, por ejemplo (Cañal, 1997), y eso era un impedimento a la hora de entender un proceso como el de la fotosíntesis y cualquier pregunta mínimamente específica al respecto. Las preguntas, si tenían que ser comunes para los distintos cursos, resultarían demasiado sencillas, incluso obvias para los niveles superiores.

Si el cuestionario se diseñaba para que pudieran responder alumnos y alumnas del primer ciclo de la ESO podíamos encontrarnos con que no obteníamos ningún tipo de dato significativo ni relevante en los niveles superiores. Pero, en el caso de que la afirmación de Cañal fuera cierta y tuviera una gran incidencia, revelaría esta evolución de las ideas alternativas tendentes a incrementar según los estudiantes aumentaban su formación académica.

Aún a riesgo de encontrarnos con un estudio que no nos sirviera, decidimos utilizar un cuestionario de preguntas muy básicas e intentar comprobar si esa afirmación de Cañal era correcta.

De esta manera, en el momento en el que definimos los objetivos del estudio y diseñamos el cuestionario para recoger los datos de los estudiantes los objetivos fueron los siguientes:

- Destacar la ausencia de ciertos conocimientos previos como la noción de que los gases son sustancias que se consideran cruciales para comprender el proceso de la fotosíntesis.
- Detectar la presencia de ciertos preconceptos en los estudiantes de niveles de Secundaria; sobre todo aquellos relacionados con la idea de que la fotosíntesis se trata, básicamente, de un intercambio gaseoso.
- Comprobar si la afirmación de Cañal, de que existe un aumento de algunos preconceptos a medida que aumenta la formación científica de los estudiantes, es cierta.

Al tratarse de un trabajo fin de máster, la población a la que se le pasó los cuestionarios fue modesta. Los cuestionarios se pasaron a un total de 235 estudiantes divididos en 4 niveles académicos diferentes: 117 alumnos de 2º de la ESO, 31 alumnos de 4º de la ESO de la especialidad de letras, 55 alumnos de 4º de la ESO de la especialidad de ciencias (con la asignatura de biología) y 32 alumnos de 2º de Bachillerato de la especialidad de ciencias para la salud (con la asignatura de biología). Los cuestionarios se pasaron en el curso académico 2010-2011, a los alumnos de la ESO de un colegio concertado de la zona de Suances y la Quinta de los Molinos de la ciudad de Madrid y a los alumnos de Bachillerato de un colegio privado de la misma zona. Este barrio tiene un nivel económico y cultural medio-alto. El motivo es que el colegio concertado donde tuvo lugar la primera parte de la investigación, no tenía los cursos de Bachillerato. Así que se escogió un colegio de la zona al que muchos de esos alumnos iban si querían continuar con sus estudios. La diferencia en el número de estudiantes encuestados de cada nivel se debe a que todos los alumnos de 2º de la ESO cursan la asignatura de *Ciencias Naturales*, pero a partir de 4º de la ESO comienzan a escoger itinerarios; al principio más generales y después más específicos.

A los alumnos de 2º de la ESO que estaban cursando la asignatura de *Ciencias Naturales* se les pasó el cuestionario antes de que empezaran con los temas relacionados con la biología ese curso, por lo tanto, en teoría, solo contaban con los conocimientos en biología trabajados en 1º de la ESO y en los niveles de Primaria y unos conocimientos de química muy básicos. A los alumnos de 4º de la ESO, tanto de la especialidad de ciencias como a los de letras, se les pasó el cuestionario cuando los de ciencias ya habían trabajado los temas de biología y comenzaban con los temas de geología. Y a los alumnos de 2º de Bachillerato se les pasaron los cuestionarios casi al final de su curso académico, cuando habían dado todos los temas a excepción de la inmunología. Estos estudiantes ya habían trabajado todos los temas relacionados con la célula, los orgánulos y el metabolismo; y, por consiguiente, ya habían trabajado en profundidad el tema de fotosíntesis y de la respiración celular. Cabe destacar que en menos de un mes estos alumnos se examinarían de las pruebas PAU (Pruebas de Acceso a la Universidad).

I.1. EL CUESTIONARIO DEL ESTUDIO PREVIO

La herramienta que se usó para recoger los datos de esa investigación fue diseñada de manera que permitiera a los estudiantes expresar sus ideas de una forma bastante más abierta que el cuestionario utilizado para la investigación de esta propia tesis. Lo cierto es que en aquel momento desconocíamos lo que podíamos encontrar y el trabajo fue concebido como un pequeño sondeo, como una humilde toma de contacto. Sin una idea previa bien formada, este tipo de preguntas nos aportarían una información valiosa con la que trabajar y de la que obtener mucha información.

Por el motivo anteriormente expuesto, la prueba que se les pasó a estos estudiantes tenía más forma de examen que de cuestionario.

CUESTIONARIO:

Curso:

Edad:

1. Señala con una cruz los seres vivos que respiran:

- | | |
|----------|-------------|
| • Perro | • Mosquitos |
| • Gusano | • Hongo |
| • Musgo | • Mejillón |
| • Coral | • Manzana |
| • Hierba | • Algas |

2. Di si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas

1. La fotosíntesis es el proceso contrario a la respiración.
2. Las plantas hacen la fotosíntesis por el día y respiran por la noche.
3. Sólo las plantas de color verde realizan la fotosíntesis.
4. Los gases son sustancias.
5. Es peligroso dormir con plantas por la noche porque nos podemos quedar sin oxígeno.
6. El gas CO₂ es alimento para las plantas.
7. Las raíces son como la boca de las plantas.
8. Las plantas comen tierra.
9. La fotosíntesis es equivalente a la respiración de los animales.
10. El alimento de las plantas son los restos de animales muertos y excrementos de animales (abono).

3. Di cuáles son orgánicos y cuáles son inorgánicos:

CO₂; Azúcar (Glucosa); O₂; Célula; Sal

4. ¿Para qué realizan la fotosíntesis las plantas?

- 5. ¿Qué es la Nutrición autótrofa?**
- 6. Una vez introducido el oxígeno en el cuerpo ¿A dónde va? ¿Dónde se utiliza?**
- 7. Realiza un dibujo del proceso de la fotosíntesis.**

Como se puede ver, el cuestionario está formado por preguntas de 3 tipos muy distintos. Las preguntas 1, 2 y 3 son preguntas que tienen dos posibles respuestas; la primera es de sí/no (respira o no respira), la segunda de verdadero/falso y se compone a su vez de 10 preguntas, y la tercera, de nuevo tienen que elegir entre dos opciones, materia orgánica o inorgánica. Las preguntas 4, 5 y 6 son preguntas cortas pero abiertas donde el estudiante puede escribir lo que quiera. Y la pregunta 7 pide que los encuestados realicen un dibujo del proceso.

Los dibujos han sido considerados como instrumentos de comparación simple a niveles internacionales (Prokop & Fancovicová, 2006; Köse, 2008). Mientras que a los estudiantes les disgusta contestar preguntas, dibujar les resulta entretenido, fácil y rápido (Köse, 2006). Además, los dibujos nos muestran una “ventana” a sus pensamientos y sentimientos, principalmente porque reflejan una imagen de sus mentes (Thomas & Silk, 1990). Como técnica para la exploración de ideas, el dibujo tiene un claro carácter holístico que previene además a los estudiantes del sentimiento constrictivo de tener que restringir su conocimiento a las preguntas específicas. Es también una alternativa muy útil para aquellos estudiantes que tienen dificultades expresando sus ideas verbalmente (Rennie & Jarvis, 1995). Así pues, la pregunta 7 nos sirvió para comprobar si los resultados que obtenemos del resto de las preguntas del cuestionario se apoyan en la idea mental que los estudiantes tienen acerca del proceso de la fotosíntesis o si no es así.

I.2. LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO PREVIO

Para centrarnos en aquellas cuestiones que nos ofrecen información interesante para el estudio que vamos a presentar después, no comentaremos los resultados obtenidos en todas las preguntas, sino solo en aquellas que nos sirvan de punto de partida o como referencia con la que comparar los resultados que posteriormente analizaremos sobre el presente estudio.

Así pues, solo analizaremos los resultados obtenidos en 7 de las 10 cuestiones de la pregunta 2 (“Di si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas”). Hemos obviado la cuestión 4 (“los gases son sustancias”) ya que lo que persigue es poner de manifiesto una carencia acusada de base para poder comprender procesos de carácter bioquímico en los niveles en los que se explica la fotosíntesis. Nuestro estudio actual no va a analizar la problemática en los niveles de Secundaria ni Bachillerato, por lo que esta cuestión no resulta relevante. Tampoco analizaremos los resultados de las cuestiones 6 (“El gas CO₂ es alimento para las plantas”) y 8 (“Las plantas comen tierra”). La primera se repetirá en los cuestionarios utilizados para presente estudio y será entonces cuando se analizará en profundidad la problemática asociada a esta cuestión en particular. La segunda es una idea muy antigua, procedente de la época de Aristóteles, el cual creía que las plantas tomaban los nutrientes de forma “predigerida” del suelo, que sería el gran “estómago” de las plantas. Así dedujo que la plantas comían tierra. De nuevo es una idea útil para analizar la situación de la cuestión en Educación Secundaria puesto que se encuentra muy presente en los niveles de Primaria (Cañal, 2005), pero para nuestro estudio, no tiene mayor relevancia.

Del resto de preguntas, solo ofreceremos el análisis de los resultados obtenidos de la preguntas: 4 (“¿Para qué realizan la fotosíntesis las plantas?”), 5 (“¿Qué es la Nutrición Autótrofa?”) y 7 (“Realiza un dibujo del proceso de la fotosíntesis”). El resto de cuestiones tratan conceptos como el de la respiración o el de materia orgánica.

Sin pretender extendernos más de la cuenta, creemos muy conveniente mostrar y analizar brevemente estos resultados ya que la presente Tesis no analiza la situación actual de la enseñanza de la nutrición vegetal sino que parte de ella para investigar sus posibles causas. Por lo tanto, da por hecho que el proceso de fotosíntesis y la nutrición de las plantas es un tópico muy conflictivo en las aulas; idea que se apoya en numerosas investigaciones al respecto. Este pequeño análisis de la situación es tremendamente humilde comparado con todos los estudios que hay al respecto, pero sirve para comprobar que ese punto de partida es sólido.

De igual manera, resulta importante valorar en su contexto los resultados que se muestran a continuación. Hay que recordar que el cuestionario se pasó solo a un total de 235 alumnos, pero que, en realidad, cada porcentaje no está dado sobre el total de alumnos sino respecto al total de cada nivel académico estudiado. En realidad estamos hablando de 117 alumnos de 2º de la ESO, 31 alumnos de 4º de la ESO de la especialidad de letras, 55 alumnos de 4º de la ESO de la especialidad de ciencias y 32 alumnos de 2º de Bachillerato. Todos los cuestionarios se pasaron en el mismo año académico en un colegio de un colegio concertado y otro privado de una zona determinada de la ciudad de Madrid. Por ello, los valores numéricos exactos de los porcentajes no tienen un valor representativo de la población en general; no son extrapolables. Pero sí muestran una tendencia que apoya las conclusiones y las ideas que encontramos en la bibliografía sobre la enorme presencia de preconcepciones e ideas alternativas sobre la fotosíntesis y que algunas de esas ideas, en vez de desaparecer según aumenta la formación académica en ciencias, parecen aumentar.

- Pregunta 2.1: La fotosíntesis es el proceso contrario a la respiración.

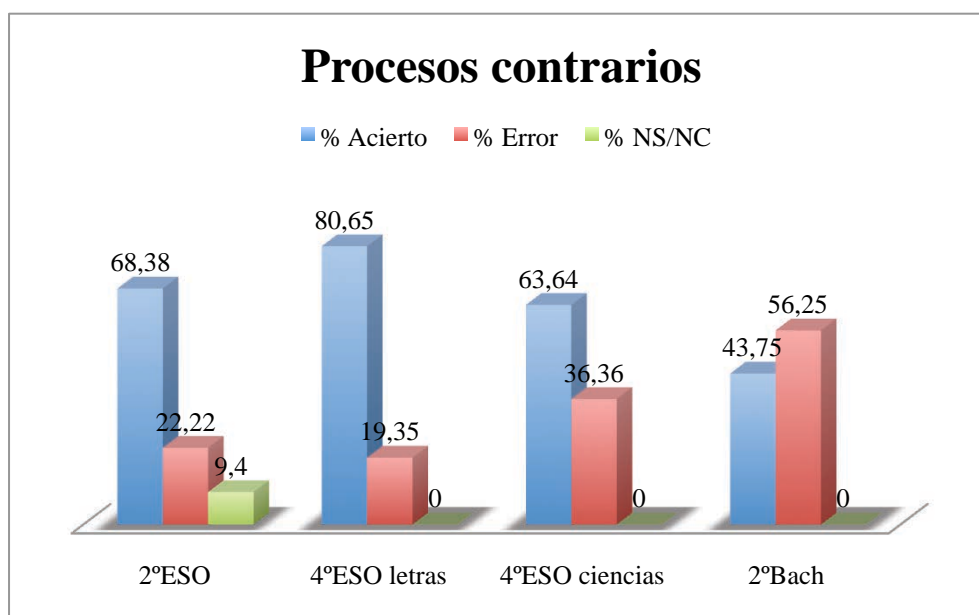


Gráfico I.1. Procesos contrarios

La idea de que la fotosíntesis es el proceso contrario a la respiración se encuentra en la bibliografía (Cañal, 2005; Angosto, 2013) como una de las ideas más reiteradas tanto por los estudiantes de Secundaria, como por los profesores e, incluso, por los propios libros de texto. Esta problemática se analizará detenidamente más adelante por lo tanto ahora solo expondremos lo que obtuvimos con los cuestionarios de este estudio previo. Por supuesto, que los estudiantes no consideren que sean procesos contrarios no les hace comprender ambos procesos, pero los resultados de esta pregunta parecen mostrar que cuanto más información reciben, aumenta en ellos la idea de que estos procesos son contrarios. Esta idea alternativa parece proceder de los profesores y/o de los libros de texto. Cañal ya analizó esta problemática en los libros de texto de Secundaria y comprobó que esta idea sí se encuentra en ellos (Cañal, 2005).

De un solo vistazo a la gráfica podemos ver una tendencia a que esta idea aumente en los estudiantes cuanto mayor es su formación

académica ya que observamos el aumento de respuestas erróneas. Parece que, en líneas generales, en todos los cursos, menos en 2º de Bachillerato hay más alumnos que tienen una idea correcta que los que están confundidos a este respecto.

No olvidemos que los alumnos de 2º de la ESO solo poseen la formación en biología de lo que trabajaron en 1º de la ESO y en E. Primaria, ya que durante aquel curso académico (2010-2011) aún no habían comenzado la parte de biología de la asignatura de Ciencias Naturales. Los de 4º de la ESO de la rama de Letras, sí que habían recibido la formación de 2º de la ESO de biología, donde, había salido el tópico de la nutrición vegetal y la fotosíntesis aunque de forma muy ligera. Así que dependiendo del profesor se habría hecho más o menos hincapié en el proceso fotosintético; aún así, solo habrían trabajado la definición, nunca el proceso a nivel bioquímico. Y, además, habrían cursado 3º de la ESO con la biología obligatoria. Pero, en el currículo de este curso solo se trabajan temas de fisiología y anatomía humana, por lo que el concepto de fotosíntesis no habría salido, al menos de manera formal, en clase.

Sin embargo, habría que tener en cuenta que cuando se pasaron los cuestionarios a los niveles de la ESO fue a finales de abril, por lo que estos estudiantes habían dejado el tema de la biología atrás hacía ya varios meses. Además, el perfil de los alumnos suele ser de poco interés o afinidad por las ciencias. Sin embargo, encontramos que el 80,65% de ellos dieron la respuesta correcta. Vemos que el índice de error aumenta desde el 22% en 2º de la ESO (más un 9,4% que no responde), el 19,35% en 4º de la ESO de Letras, el 36,36% de los de 4º de la ESO de Ciencias y superando a más de la mitad de los alumnos de 2º de Bachillerato (56,25%) que en menos de un mes se presentarían a las pruebas PAU.

- Pregunta 2.2: Las plantas hacen la fotosíntesis por el día y respiran por la noche.

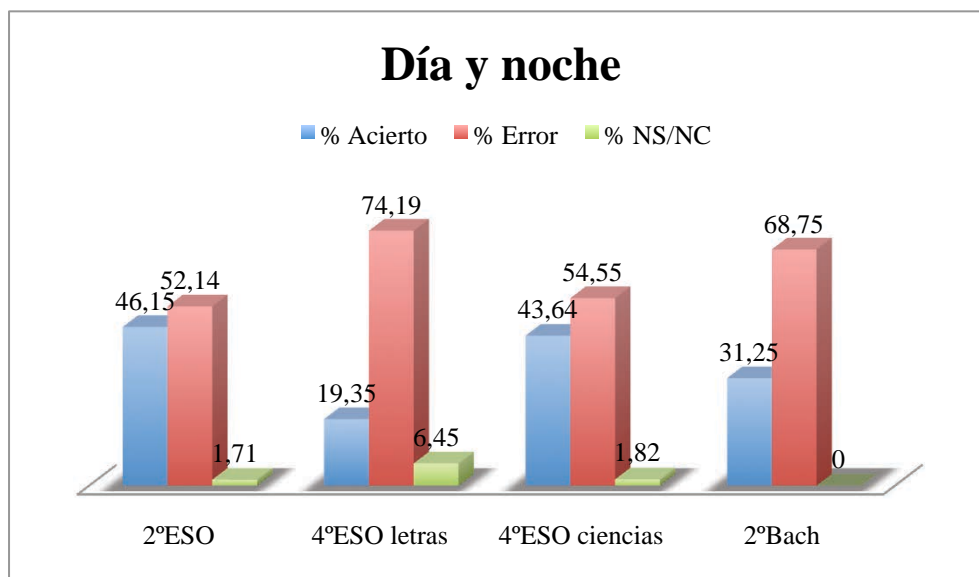


Gráfico 1.2. Día y noche

Como ya se ha expuesto, la idea de que ambos procesos se hacen en momentos diferentes del día, o que si la planta está realizando uno, no puede realizar el otro es una de las ideas erróneas más común en E. Secundaria (Wandersee, 1983; Haslam & Treagust, 1987; Tamir, 1989; Hill, 1997; Çapa, 2000; Sensoy, 2002; Tekkaya & Balci, 2003; Köse, 2004; Çepni & Keleş, 2006; Marmaroti & Galanopoulou, 2006; Yenilmez & Tekkaya, 2006; Keleş & Kefeli, 2010).

Con los resultados de esta pregunta podemos observar que esta idea se encuentra muy presente, superando, en todos los niveles estudiados, a la mitad de los encuestados. Además, obviando a los estudiantes de 4º de la ESO de Letras, de nuevo, muestra cierta tendencia a aumentar el número de alumnos con errores a este respecto cuanto más avanzado es el curso. Es cierto que, a diferencia de la pregunta anterior, esta no muestra una tendencia muy marcada, pero lo que es seguro es que no disminuye su presencia en los estudiantes cuanto mayor es su formación académica.

- Pregunta 2.3: Sólo las plantas de color verde realizan la fotosíntesis.

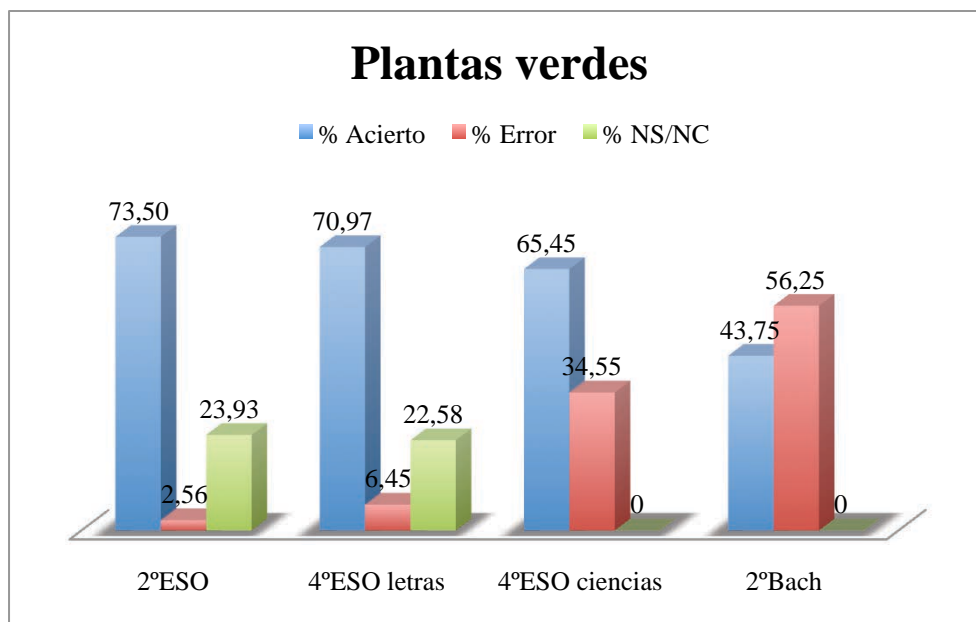


Gráfico I.3. Plantas verdes

En esta cuestión la tendencia a aumentar el índice de error según los encuestados tienen una mayor formación en biología es clarísima. Además, observamos que en los cursos inferiores y los de 4º de la ESO de letras muestran, en un porcentaje elevado (más de una quinta parte), que desconocen la respuesta y los que se atreven a responder, por lo general aciertan. Los alumnos que se encuentran en cursos en los que han escogido la optativa de biología responden todos a la pregunta, sin embargo, se equivocan mucho más.

El porcentaje de error va aumentando a medida que estudiamos niveles académicos superiores desde 2,56% en los alumnos de 2º de la ESO hasta más de la mitad en los alumnos de Bachillerato.

De nuevo, podríamos pensar que el origen de esta idea alternativa sería más la propia formación académica en ciencias, dicho de otra manera, los profesores y/o los libros de texto que la ausencia de conocimientos al respecto.

- Pregunta 2.5: Es peligroso dormir con plantas por la noche porque nos podemos quedar sin oxígeno.

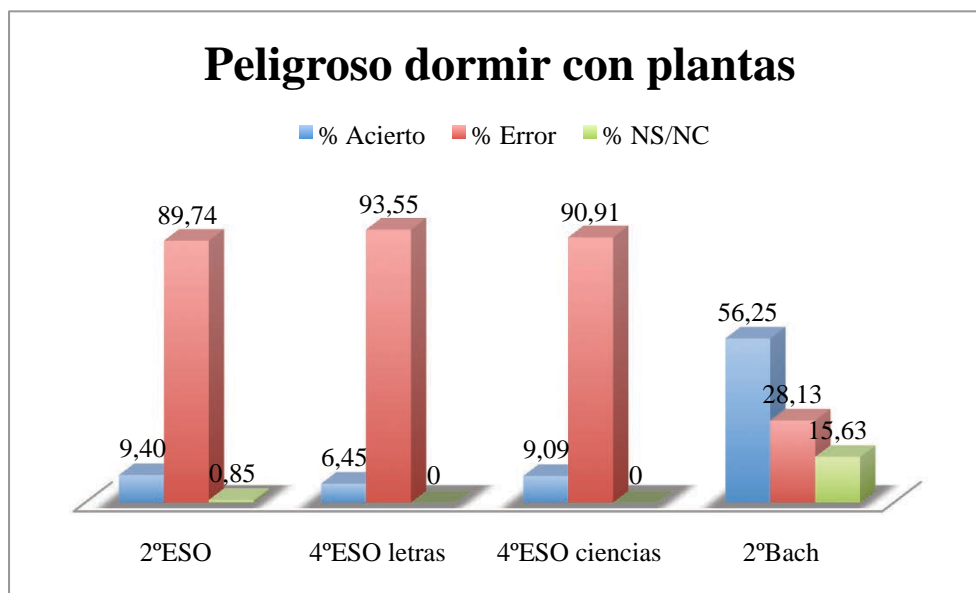


Gráfico I.4. Peligroso dormir con plantas

Esta idea aparece como un preconcepto asociado a la transmisión de las ideas populares (Cañal, 2005) por lo que se presuponía que disminuiría según aumentara la formación académica al respecto.

A diferencia de las otras preguntas, en las que el índice de error en los alumnos de Bachillerato era considerablemente mayor que en los niveles de Secundaria, aquí se observa una clara disminución de este preconcepto en los alumnos de 2º de Bachillerato; aunque siga presente.

- Pregunta 2.7: Las raíces son como la boca de las plantas.

Esta idea se asocia a la tendencia a solapar el modelo animal sobre el vegetal para intentar dar sentido a las estructuras, las funciones y los procesos de los seres vivos. Además en la enseñanza de las ciencias existe una clara predominancia del modelo antropomórfico y los profesores, con frecuencia, usan imágenes mentales como esta con la

intención de acercar a los alumnos a modelos anatómicos y fisiológicos diferentes al del ser humano.

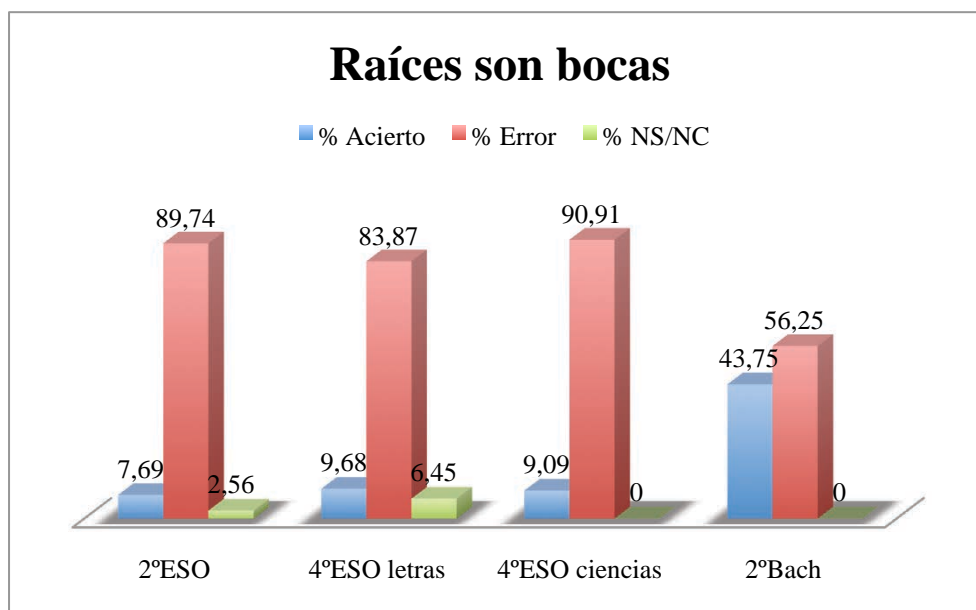


Gráfico I.5. Raíces son bocas

Sin embargo, aunque pueda verse como una metáfora sin importancia, veremos que esta idea es errónea, ya que lo que debemos hacer con la enseñanza de las ciencias es abrir la mente de los alumnos, enseñarles diferentes modelos en la naturaleza, no pretender que todo encaje en un solo patrón.

Observamos en estos resultados que, igual que ocurría con la cuestión anterior, hay un claro descenso de esta idea en los alumnos de 2º de Bachillerato. La razón sería que la formación académica en ciencias sí presenta diferentes modelos anatómicos que hacen que los alumnos no necesiten encontrar la boca de las plantas, los ojos de las bacterias y el estómago en los hongos.

- Pregunta 2.9: La fotosíntesis es equivalente a la respiración de los animales.

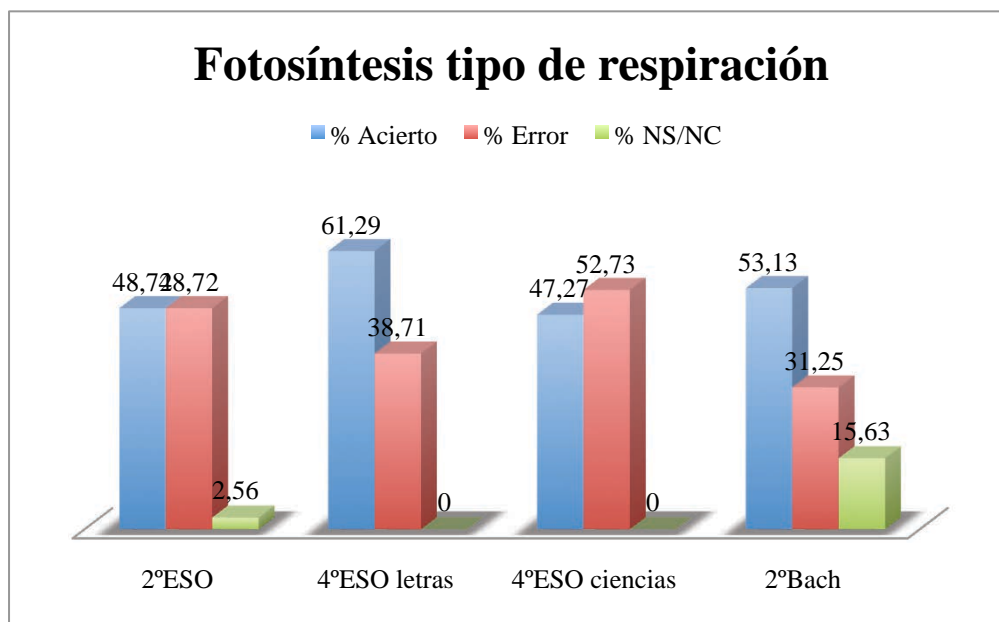


Gráfico I.6. Fotosíntesis tipo de respiración

Esta pregunta no muestra una tendencia clara en la presencia de esta idea alternativa en los diferentes niveles académicos. Lo único que podemos decir es que se comprueba que la idea de que la fotosíntesis es un tipo de respiración de las plantas aparece en todos los niveles académicos estudiados. En la bibliografía este preconcepto es uno de los más repetidos (Maskill & Cachapuz, 1989; Thomas & Silk, 1990; Hazel & Prosser, 1994; Abdullah & Scaife, 1997; Cañal, 1999; Prokop & Fancovicová, 2006; Çepni & Keleş, 2006; Marmaroti & Galanopoulou, 2006; Yenilmez & Tekkaya, 2006; Köse, 2008), defendiendo que aparece tanto en los niveles de E. Primaria como de E. Secundaria.

Ante esta distribución, lo que cabe preguntarse es por qué la formación académica no es capaz de eliminar, ni siquiera de reducir, la presencia de esta idea alternativa.

- Pregunta 2.10: El alimento de las plantas son los restos de animales muertos y excrementos de animales (abono).

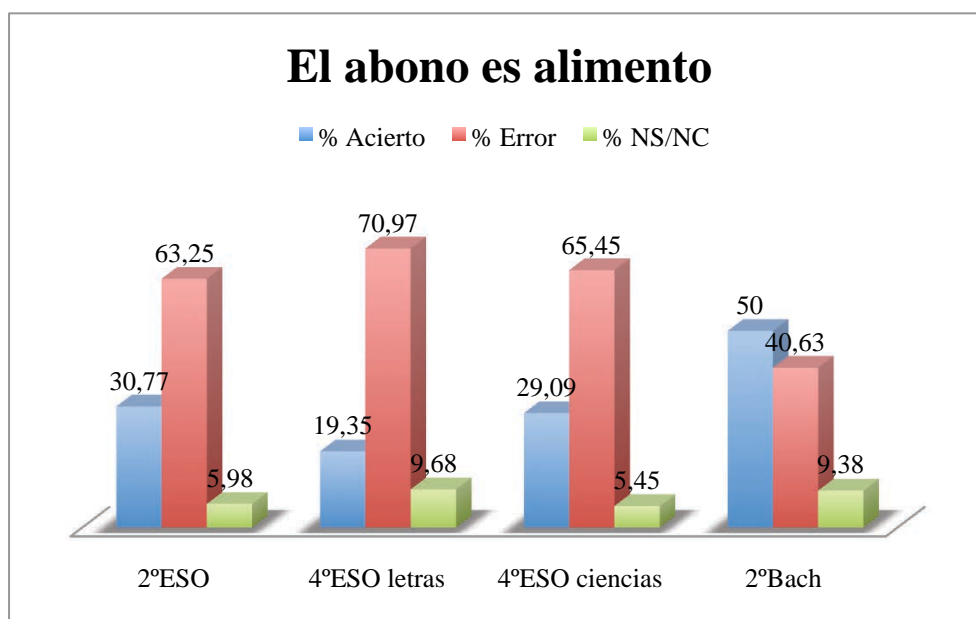


Gráfico I.7. Abono es alimento

Es entendible de dónde sale esta idea alternativa. Los estudiantes observan que a las plantas se las abona “para que crezcan más” y se les ha dicho que el abono son las heces de los caballos (idea que también proviene del conocimiento popular; ya que hoy en día se usa como abono *compost vegetal* muy a menudo).

De nuevo nos encontramos una tendencia clara, pero sí parece que hay una pequeña disminución de este preconceito en 2º de Bachillerato. Sin embargo lo que haremos con esta pregunta es compararla con las siguientes.

○ Pregunta 4: ¿Para qué realizan la fotosíntesis las plantas?

	FINALIDAD FOTOSÍNTESIS	2ºES O	4ºESO Letras	4ºESO Ciencias	2º Bach	
	RESPUESTAS de los encuestados	%	%	%	%	TOTA L
1	No contestan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Para respirar	31,62	19,35	7,27	6,25	20,85
3	Para transformar el CO ₂ en O ₂ /para obtener O ₂	16,24	12,90	14,55	12,50	14,89
4	Para respirar como los animales pero al revés	6,84	0,00	0,00	0,00	3,40
5	Para respirar por la noche y expulsar el O ₂ por la mañana	1,71	0,00	9,09	0,00	2,98
6	Para obtener energía	0,00	0,00	14,55	15,63	5,53
7	Para transformar la luz en alimentos	4,27	0,00	7,27	0,00	3,83
8	Para crecer, transformarse, desarrollarse	11,11	0,00	3,64	0,00	6,38
9	Para obtener energía y alimento	0,00	0,00	7,27	0,00	1,70
10	Para transformar la savia bruta en elaborada	2,56	0,00	0,00	9,38	2,55
11	Para fabricar sus propios alimentos	17,09	19,35	12,73	12,50	15,74
12	Para obtener materia orgánica (a partir de inorgánica)	4,27	0,00	10,91	0,00	4,68
13	Transformar CO ₂ , H ₂ O y sales minerales en materia orgánica por la energía solar	0,00	0,00	7,27	40,63	7,23
14	Respuestas con el proceso incompleto(*)	0,00	6,45	0,00	0,00	0,85
15	Otras respuestas erróneas (**)	4,27	41,94	5,45	3,13	9,36

Tabla I.1. Finalidad de la fotosíntesis

Puesto que en este Anexo se exponen las ideas generales de los resultados que se obtuvieron en el estudio que realizamos previamente a concretar nuestros objetivos para el presente trabajo, no vamos a analizar en profundidad cada respuesta con sus porcentajes. Para dar una interpretación concisa y coherente a los resultados obtenidos resulta conveniente aunar ciertas respuestas al considerarlas parecidas por el tipo de error que encierran. Así se ha considerado que las respuestas 2, 3, 4 y 5 se pueden unir ya que todas muestran la idea de que la fotosíntesis es un proceso básicamente de intercambio gaseoso (2. Para

respirar; 3. Para transformar el CO_2 en O_2 o para obtener O_2 ; 4. Para respirar como los animales pero al revés; 5. Para respirar por la noche y expulsar el O_2 por la mañana).

Lo mismo ocurre con las respuestas 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y algunas de la pregunta 14 (respuestas con el proceso incompleto(*)) que consideran que la finalidad del proceso está relacionada con la nutrición de alguna manera, ya sea más o menos certera la manera en la lo describen (6. Para obtener energía; 7. Para transformar la luz en alimentos; 8. Para crecer, transformarse, desarrollarse; 9. Para obtener energía y alimento; 10. Para transformar la savia bruta en elaborada; 11. Para fabricar sus propios alimentos; 12. Para obtener materia orgánica (a partir de materia inorgánica); 13. Para transformar CO_2 , H_2O y sales minerales en materia orgánica gracias a la energía solar).

Como ya se ha expuesto a lo largo de todo este estudio, consideramos un error muy común aquellas respuestas que consideran a la fotosíntesis como un proceso de intercambio gaseoso (respuestas 2, 3, 4 y 5). También es muy común confundirlo con la respiración (respuestas 2, 4 y 6) o considerar que ambos procesos, respiración y fotosíntesis, ocurren en momentos diferentes del día (respuesta 5). También se ha hecho mucho hincapié en todas las ideas que confunden los conceptos *nutriente* y *alimento*.

Podríamos considerar correctas las respuestas 10, 12 y 13, a pesar que la respuesta 10 obvia el papel fundamental del CO_2 en la fotosíntesis y como compuesto inorgánico fundamental para la formación de lo que denomina “savia elaborada” pero, sin embargo, no forma parte la “savia bruta”. Aún así, la idea de que la finalidad de la fotosíntesis es fabricar ciertos componentes orgánicos es lo que buscábamos. De los resultados expuestos en esta tabla se puede extraer la conclusión de que pocos son los alumnos que conocen la finalidad de la fotosíntesis; solo 14,46%

de los 235 alumnos encuestados dieron alguna de estas tres respuestas, siendo así, los únicos que pueden tener una idea correcta de la finalidad de este proceso.

Más del 40% de los estudiantes consideran a la fotosíntesis un proceso de intercambio gaseoso. Este error es más comprensible en el nivel de 2º de la ESO, puesto que como ya se ha expuesto, los cuestionarios fueron resueltos antes de trabajar el tema de la nutrición de las plantas, por lo que se presupone que las respuestas a este nivel provendrán de lo estudiado en cursos anteriores donde solo se nombra el proceso para resaltar su gran importancia para el planeta como generador de oxígeno. Además, es cierto que en los primeros años de la ESO, los alumnos no poseen conocimientos sobre química suficientes para comprender este proceso de forma completa, así que los profesores, al igual que en E. Primaria, no pueden explicar el proceso en los términos correctos. Resulta pues sencillo comprender que esta idea de que la finalidad de la fotosíntesis es la obtención de oxígeno surja en este nivel como la mayoritaria con un 38,46% entre las respuestas 2 (para respirar) y la 4 (para respirar como los animales pero al revés). A pesar de que se percibe una disminución de esta idea según avanza la formación académica, no se erradica completamente apareciendo en un 6,25% de los alumnos de 2º de Bachillerato.

En estos resultados se reflejan dos preconceptos encontrados en muchos de los estudios sobre este tema y se muestran coherentes con respecto a las preguntas de verdadero y falso:

1. La fotosíntesis es el proceso mediante el cual las plantas respiran.
2. La finalidad del proceso o, al menos, lo más importante, es que se expulsa O_2 , como si de un favor al resto de los seres vivos del planeta se tratara.

Respecto a la otra tanda de repuestas, la que expresa que el objetivo de la fotosíntesis es la producción de alimento (respuestas 7, 9 y 11) representa el 21,36% de los alumnos de 2º de la ESO, el 27,27% de los alumnos de 4º de la ESO de Ciencias y el 12,50% de los de Bachillerato. Es importante remarcar que la mayor parte de las respuestas han sido ligeramente distintas en su expresión y que hemos sido nosotros los que las hemos englobado en la idea que mostramos en la tabla. Sin embargo la respuesta “para fabricar su propio alimento” es idéntica en todos aquellos alumnos que han sido contabilizados dentro de esta respuesta. Esto coincide con una de las frases más repetida en los libros de texto de Primaria y Secundaria con respecto a la nutrición vegetal, por lo tanto parece indicar que esta frase se enseña siempre así y que se insiste sobre ella lo suficiente para que los alumnos la aprendan de memoria y la recuerden. Sin embargo, no podemos considerar que este porcentaje de alumnos comprenda la frase o la tenga integrada ya que más del 85% de los mismos alumnos que han contestado esto responden erróneamente otras preguntas que tratan exactamente el mismo concepto, como por ejemplo la pregunta de verdadero y falso (Pregunta 2) número 10: “El alimento de las plantas son los restos de animales muertos y excrementos de animales (abono)” o los mismos dibujos en los que jamás se muestra ningún tipo de producción a excepción, por supuesto, del oxígeno. Parece ser una respuesta aprendida de memoria que utilizan también en la siguiente pregunta “¿Qué es la Nutrición Autótrofa?” donde la gran mayoría escriben esta misma frase.

Igualmente, y aunque gracias a otras preguntas se confirme que realmente no lo entienden o al menos no lo suficiente como para relacionar conceptos y así no contradecirse en otras respuestas, observamos un gradiente claro en la complejidad de estas respuestas favorable cuanto mayor es el nivel. Por ejemplo hay 4 alumnos, entre los alumnos de 4º de la ESO de Ciencias y los de 2ª de Bachillerato, que

nombran el término anabolismo en esta definición aunque lo justifican mal. Por ejemplo uno escribe: “ Es anabólico ya que no consume energía, sino todo lo contrario, la crea”, otro escribe: “Anabolismo. Ya que produce oxígeno y ATP”. Como podemos comprobar en estas respuestas, conocen el término, saben que tiene que ver con la fotosíntesis pero están muy lejos de comprenderlo. Solo un alumno de 4º de la ESO de Ciencias escribió: “Proceso anabólico. Obtiene energía del Sol y transforman la materia inorgánica en orgánica que les sirve de alimento”. Sin embargo este mismo estudiante en su dibujo localiza la fotosíntesis en la clorofila de las mitocondrias y muestra como el proceso expulsa CO₂, lo que de nuevo nos demuestra que más que entender lo que escriben, se lo saben de memoria. Además de todas estas, han aparecido otras respuestas minoritarias (**) como por ejemplo: “Para combinar el O₂ y el CO₂ y hacer alimento” o “Para obtener energía del CO₂ desprendido por el Sol” o “Para alimentarse del Sol y de las sustancias de la tierra”. La idea de que el CO₂ proviene del Sol se ha detectado también en los dibujos de 4 alumnos, dos de 2º y dos de 4º de la ESO de Ciencias. Lo cual señalaría errores de conceptos más profundos con los que resultaría imposible que un alumno llegara a comprender procesos complejos como el de la fotosíntesis.

○ Pregunta 4: ¿Para qué realizan la fotosíntesis las plantas?

Lo primero que puede resultar llamativo es que una quinta parte de los alumnos encuestados no responden o escriben “no sé” en esta pregunta, cuando es uno de los conceptos más repetidos en los libros de ciencias de la naturaleza y biología desde los niveles de E. Primaria, pasando por Secundaria y Bachillerato. Además, contrasta con la pregunta anterior, en la que todos los estudiantes responden algo. Es cierto que este número se ve muy incrementado en los estudiantes de 4º de la ESO de Letras pero aún así resulta alarmante que el 20,51% de los alumnos de 2º de la ESO no responda nada a esta pregunta.

NUTRICIÓN AUTÓTROFA		2ºESO	4ºESO Letras	4ºESO Ciencias	2º Bach	
RESPUESTAS de los encuestados		%	%	%	%	TOTAL
1	No contestan	20,51	54,84	9,09	6,25	20,43
2	Fabrican sus propios alimentos	63,25	32,26	58,18	68,75	58,72
3	Se obtiene materia orgánica a partir de materia inorgánica gracias al Sol	3,42	0,00	0,00	6,25	2,55
4	Se alimentan por ellos mismos	12,82	12,90	21,82	0	13,19
5	Se obtiene la energía del Sol	0,00	0,00	9,09	15,625	4,26
6	Otras respuestas erróneas	0,00	0,00	1,82	3,125	0,85

Tabla I.2. Definición de nutrición autótrofa

Sobre el resto de las respuestas podríamos decir que al igual que se describió en la pregunta anterior, llama muchísimo la atención que 58,72% de los estudiantes definen la nutrición autótrofa como aquella en la que los organismos fabrican su propio alimento, exactamente. Sin embargo, al igual que ocurría en la pregunta anterior, en las demás preguntas reflejen ideas incoherentes al compararlas. También muestra un carácter bastante homogéneo en su expresión la respuesta 4 (“Aquella en la que se alimentan por ellos mismos”), otra frase muy repetida en los libros de texto que parecen saberse de memoria.

Dentro de la categoría 6 (“Otras respuestas erróneas”) encontramos respuestas como: “Aquella que no necesita sustancias orgánicas para vivir” o “Aquella que obtiene los productos orgánicos del Sol” correspondientes a 4º de la ESO de Ciencias y 2º de Bachillerato respectivamente. También podemos apreciar que solo en estos dos niveles aparece otra respuesta errónea: “Aquella que obtiene la energía del Sol”. Es cierto que puede resultar comprensible que los alumnos describan la nutrición autótrofa de esta manera, ya que en estos niveles de enseñanza quizá se les nombre la existencia de otras formas de producción de materia orgánica a partir de inorgánica diferente a la que usa la energía lumínica, pero sin duda esta es la única que se les explica.

La única opción que podemos considerar correcta, y como ya hemos dicho sería solo parcialmente correcta, es la número 3 (“Aquella en la que se obtiene materia orgánica a partir de la materia inorgánica, gracias a la luz del Sol”). Solo 6 alumnos de los 235 han respondido así; 4 alumnos de 2º de la ESO y 2 alumnos de 2º de Bachillerato; el 2,55% del total. Ningún alumno de 4º de la ESO de Ciencias ha respondido nada parecido a esta idea.

○ Pregunta 7: Realiza un dibujo de la fotosíntesis

La utilización de dibujos como técnica de estudio de ideas es compleja ya que, como ya se ha dicho, los dibujos nos muestran una “ventana” a los pensamientos y sentimientos de los estudiantes, principalmente porque refleja una imagen de sus mentes (Thomas & Silk, 1990). Además tiene un claro carácter holístico lo que dificulta claramente su interpretación aunque a su vez le aporta un gran valor y es también una alternativa muy útil para aquellos estudiantes que tienen dificultades expresando sus ideas verbalmente (Rennie & Jarvis, 1995). Por todo esto, y puesto que nuestro estudio pretendía solamente llegar a una serie de conclusiones concretas sobre la presencia de ciertos preconceptos e ideas alternativas en los estudiantes de los niveles encuestados, estos dibujos sirvieron para confirmar lo que los estudiantes habían expresado en el resto de las cuestiones, así como la presencia de incoherencias dentro de los mismos estudiantes. Pudimos, así, confirmar la idea, al menos aparentemente, de que los alumnos se aprenden los conceptos de memoria sin llegar a asimilarlos o a entenderlos.

Al analizar los dibujos de los estudiantes parece que podríamos catalogarlos en tres niveles de conocimiento del proceso o, al menos, de los factores que actúan. Los tres niveles aparecen en todos los cursos (2º de la ESO, 4º de la ESO y 2º de Bachillerato) en proporciones

similares (ver Tabla I.3). Así que se puede afirmar que no encontramos diferencias significativas en esta pregunta entre niveles de formación.

El primer nivel lo podríamos definir como aquel que solo contempla la fotosíntesis como un proceso de intercambio gaseoso, a veces considerando el factor de la luz del Sol y otras no.

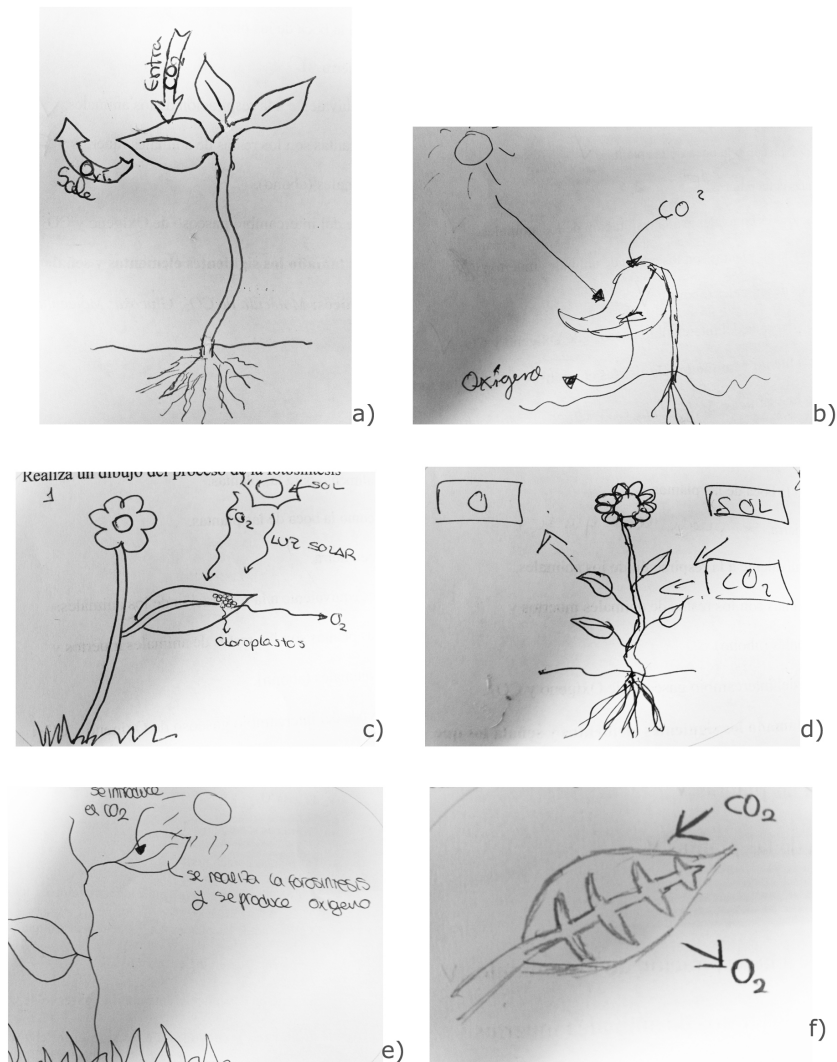


Imagen I.1: Ejemplos del nivel 1. Los dibujos a) y b) pertenecen a estudiantes de 2º de la ESO, los dibujos c) y d) a alumnos de 4º de la ESO y los dibujos e) y f) a estudiantes de 2º de Bachillerato.

El segundo nivel suele incluir al agua y a las sales minerales como factores del proceso. Estas sustancias son absorbidas desde las raíces. Ambos niveles tienen en común la representación de la planta como un sistema de caja negra, en el cual entran y salen materiales y energía pero nada se muestra de los cambios o transformaciones ocurridas en el interior.

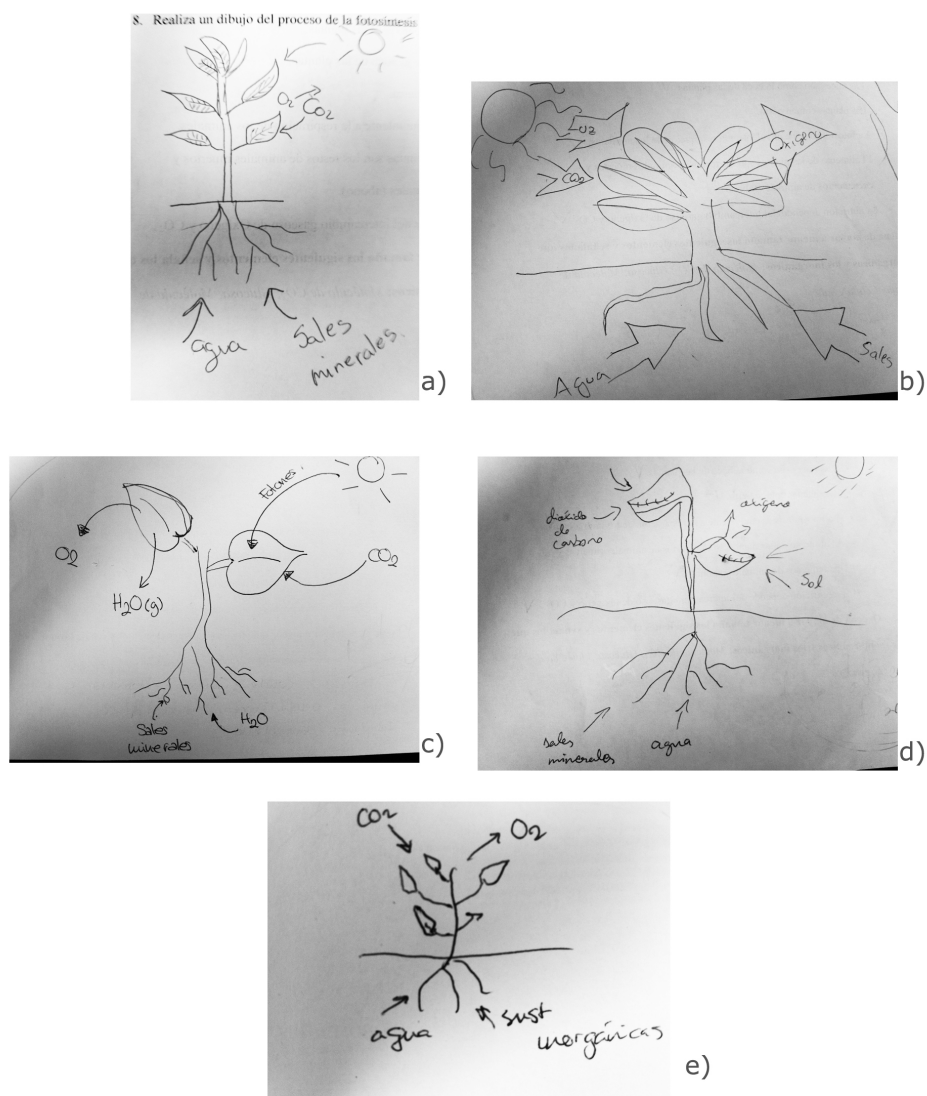
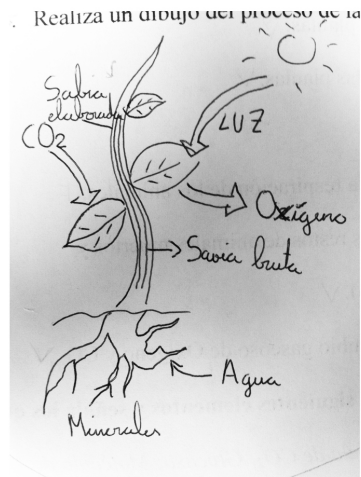
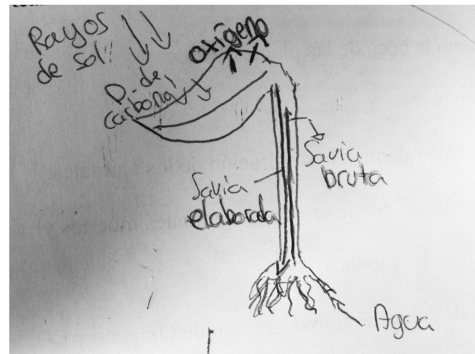


Imagen I.2: Ejemplos del nivel 2. Los dibujos a) y b) pertenecen a estudiantes de 2º de la ESO, los dibujos c) y d) a alumnos de 4º de la ESO y el dibujo e) a un estudiante de 2º de Bachillerato.

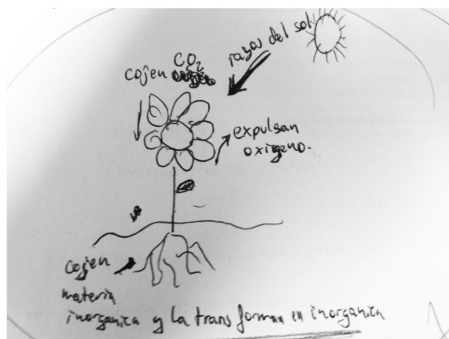
Solo el tercer nivel muestra algún tipo de producto interior, aunque los dibujos no dejan claro en todos los ejemplos que el alumno o alumna que lo dibujó entendiera del todo lo que dibujaba.



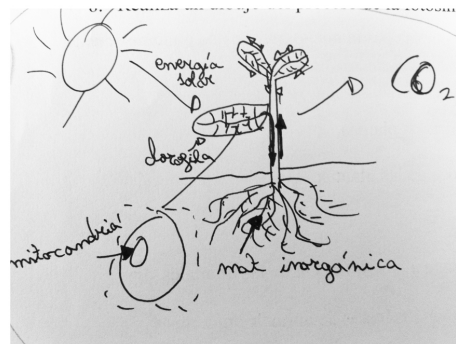
a)



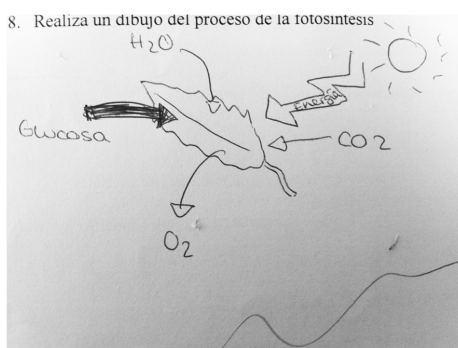
b)



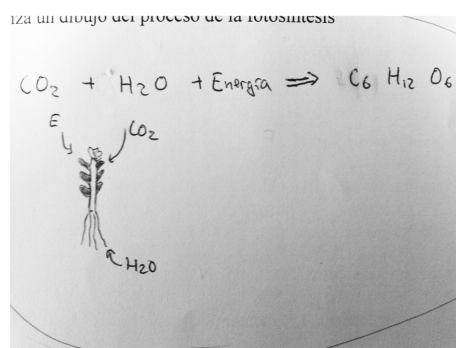
c)



d)



e)



f)

Imagen I.3: Ejemplos del nivel 3. Los dibujos a) y b) pertenecen a estudiantes de 2º de la ESO, los dibujos c) y d) a alumnos de 4º de la ESO y los dibujos e) y f) a estudiantes de 2º de Bachillerato.

Al comparar estas representaciones dibujadas de la fotosíntesis con lo que respondieron en la pregunta 4 (¿Para qué realizan la fotosíntesis las plantas?) y con la pregunta 5 (¿Qué es la nutrición autótrofa?) observamos que realmente no relacionan los conceptos o las ideas. Más del 60% de los alumnos que hicieron dibujos de nivel 3 fueron incoherentes en la pregunta 4 respondiendo que la finalidad de la fotosíntesis era algo parecido a un intercambio gaseoso.

Aunque, como ya se ha explicado, al analizar las respuestas de las preguntas 4 y 5, una gran parte de los alumnos define que las plantas fabrican su propio alimento o porque tienen nutrición autótrofa o porque realizan la fotosíntesis, en pocos dibujos se muestra la producción de ningún tipo de producto en el proceso de la fotosíntesis. El estudiante que dibujó el esquema 1 respondió en la pregunta 4: “Para transformar la materia inorgánica (por ejemplo agua y sales minerales) en materia orgánica para alimentarse”. Claramente conocía la respuesta a la pregunta 4, la ha estudiado y la recuerda, pero no comprende lo que significa ya que si así fuera habría añadido al menos esos factores que escribe. De hecho ni siquiera nombra al Sol, al CO_2 o al O_2 y sin embargo en su dibujo son los únicos factores que aparecen. Una situación similar encontramos en los estudiantes que realizaron los dibujos 3, 4 y 5. Sus respuestas a la pregunta 4 incluyen de alguna manera la producción de sustancias (a veces las describen como orgánicas, otras simplemente como alimento), sin embargo, estas sustancias son completamente omitidas en los dibujos.

Para los dibujos pertenecientes al segundo nivel podemos usar los mismos argumentos para casi el 50% de los casos. Casi el 50% de los alumnos que han hecho dibujos catalogados en este nivel han basado su explicación a la finalidad de la fotosíntesis en la producción de su alimento a pesar de que ninguno así lo muestra en su dibujo.

Algo diferente es el caso del tercer nivel, en el que queda representada claramente la producción de algún producto interior a causa del proceso.

	%Nivel 1	%Nivel 2	%Nivel 3	%NC
2º de la ESO	52,27	15,91	4,55	27,27
4º de la ESO	50,00	14,29	7,14	28,57
2º de Bachillerato	46,15	15,38	15,40	23,08

Tabla 1.3: Porcentajes del registro de los dibujos pertenecientes a los distintos niveles definidos.

I.3. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO PREVIO

Lo único que pudimos afirmar, después de este pequeño estudio, es que en los alumnos encuestados encontramos una presencia alta de los preconceptos e ideas alternativas que buscábamos y que algunas de esas ideas, lejos de desaparecer con el tiempo y la formación académica, parecen aumentar en incidencia según avanzamos en los diferentes niveles académicos.

Lo cierto es que a causa de la baja población muestral, no pudimos concluir nada de manera muy determinante, y mucho menos considerar que habíamos descubierto algo nuevo. Pero fue a partir de este estudio que surgieron las ideas y los objetivos de lo que hoy es esta Tesis Doctoral.

Anexo II.

**Cuestionario para los estudiantes
del Máster**

CURSO: _____ FECHA: _____

CUESTIONARIO 2013 para UNIVERSITARIOS Y PROFESORES**1. Marca V o F según sean Verdaderas o falsas a las siguientes afirmaciones:**

- | | |
|--|---|
| | V |
| | F |
1. La finalidad del abono es aportar los nutrientes orgánicos necesarios para la planta.
-
- | | |
|--|---|
| | V |
| | F |
2. Es peligroso dormir con plantas por la noche porque consumen el oxígeno.
-
- | | |
|--|---|
| | V |
| | F |
3. Las plantas obtienen todos los componentes inorgánicos que necesitan del suelo.
-
- | | |
|--|---|
| | V |
| | F |
4. La síntesis de aminoácidos para formar proteínas forma parte del proceso fotosintético.
-
- | | |
|--|---|
| | V |
| | F |
5. Las raíces son la boca de las plantas.
-
- | | |
|--|---|
| | V |
| | F |
6. La fotosíntesis se realiza por el día y la respiración, en cambio, por la noche.

2. Marca la opción correcta:7. ¿Cuál es la finalidad de la fotosíntesis?

A	
B	
C	
D	

- A. Producir oxígeno.
- B. Producir carbohidratos como la glucosa.
- C. Producir todos los nutrientes orgánicos (carbohidratos, aminoácidos, ácidos grasos y bases nitrogenadas)
- D. A y B son correctas.

8. ¿Para qué sirven las sales minerales como los nitratos y sulfatos?

A	
B	
C	
D	

- A. Como cofactores de las reacciones de oxido-reducción.
- B. Como sustratos que reducir hasta componentes orgánicos en el proceso fotosintético.
- C. Para formar parte de los fotosistemas.
- D. Para que funcionen las bombas y los diferentes transportes de las células.

9. ¿Qué es el CO₂ para las plantas?

A	
B	
C	
D	

- A. El gas que usan en el proceso de la respiración.
- B. Un alimento esencial.
- C. Un gas inútil que expulsan por los estomas.
- D. El compuesto que transforman en oxígeno en el proceso de fotosíntesis.

10. Sobre las células de las plantas, ¿cuál de estas afirmaciones es correcta?

A	
B	
C	
D	

- A. Todas las células de las plantas son células vegetales, tienen cloroplastos y metabolismo autótrofo.
- B. No todas las células de las plantas tienen cloroplastos, por lo tanto, estas células sin cloroplastos tienen un metabolismo heterótrofo.
- C. Todas las células de las plantas tienen metabolismo autótrofo pero no todas tienen cloroplastos.
- D. Todas las células de las plantas tienen metabolismo autótrofo excepto las de las plantas carnívoras.

11. Sobre la fotosíntesis y la respiración, ¿cuál de estas afirmaciones es correcta?

A	
B	
C	
D	

- A. Las plantas no necesitan respirar cuando hay luz porque ya obtienen la energía que necesitan de las reacciones fotosintéticas, por lo tanto solo respiran por la noche.
- B. La fotosíntesis es el proceso contrario a la respiración al ser el proceso productor de oxígeno y consumidor de CO₂.
- C. A y B son incorrectas.
- D. A y B son correctas.

12. ¿Qué significa que las plantas tengan nutrición autótrofa?

A	
B	
C	
D	

- A. Que no tienen los mismos requerimientos nutricionales que los animales.
- B. Que no necesitan los nutrientes orgánicos para crecer y desarrollarse, sólo necesitan nutrientes inorgánicos.
- C. A y B son incorrectas.
- D. A y B son correctas.

13. ¿Cuál es el destino de la savia bruta?

A	
B	
C	

- A. Las hojas
- B. Las raíces
- C. Todas las células

14. ¿Cuál es el destino de la savia elaborada?

A	
B	
C	

- A. Las hojas
- B. Las raíces
- C. Todas las células